

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Mihovil Jakov Crvelin**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. Dr. Sc. Mislav Čehil

Student:

Mihovil Jakov Crvelin

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se a doc. dr. sc. Mislavu Čehilu za pruženu pomoć prilikom izrade završnog rada.

Mihovil Jakov Crvelin



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

**Mihovil Jakov Crvelin**

Mat. br.: 0035183024

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Hidraulički proračun cirkulacije u isparivaču generatora pare**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Hydraulic fluid flow calculation in a steam generator evaporator**

Opis zadatka:

U generatoru pare isparivač je obično smješten unutar ložišta. Budući da je toplinsko opterećenje ložišta veliko, neophodno je osigurati hlađenje isparivačkih cijevi kako ne bi došlo do isušivanja stijenki cijevi isparivača. To se postiže recirkulacijom napojne vode unutar isparivača. U radu je potrebno proračunati cirkulaciju vode u isparivaču generatora pare kapaciteta 50 t/h u ovisnosti o opterećenju generatora pare koji se kreće od 30% do 100%. U radu treba koristiti prethodno napravljen termodinamički proračun generatora pare.

U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć prilikom izrade rada.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016

2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.

3. rok: 17. rujna 2016.

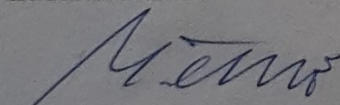
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.

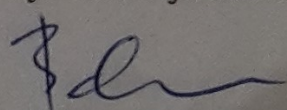
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.

3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Mislav Čehil

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	1
POPIS SLIKA .....	3
POPIS TABLICA.....	5
POPIS OZNAKA .....	6
SAŽETAK.....	8
1. UVOD.....	9
2. TEORIJSKA POZADINA HIDRAULIČKOG PRORAČUNA .....	10
2.1. Fizikalni modeli strujanja.....	10
2.2. Proračun pada tlaka po Thomovoj metodi .....	11
2.2.1. Akceleracijska komponenta pada tlaka .....	11
2.2.2. Pad tlaka uslijed trenja na stijenci i lokalnih otpora.....	12
2.2.3. Pad tlaka uslijed gravitacijskog utjecaja .....	13
2.3. Hidraulički proračun prirodne cirkulacije .....	14
2.3.1. Pad tlaka u silaznim cijevima .....	15
2.3.2. Pad tlaka u uzlaznim cijevima .....	15
Pad tlaka u uzlaznim cijevima može se podijeliti u dva dijela: .....	15
2.4. Optočni broj .....	16
3. HIDRAULIČKI PRORAČUN CIRKULACIJE VODE U ISPARIVAČU GENERATORA PARE.....	17
3.1. Postavljanje problema .....	17
3.1.1. Pretpostavke u modelu .....	18
3.1.1.1. Gustoća toplinskog toka.....	18
3.1.1.3. Koeficijenti trenja dvofaznog toka.....	19
3.1.2. Ključne jednačbe.....	21
3.1.2.1. Jednačbe masenog protoka silaznih i uzlaznih cijevi.....	21
3.1.2.2. Određivanje visine ekonomajzerskog dijela isparivačkih cijevi $H_e$ .....	23
3.1.2.4. Udio pare pojedine skupine cijevi na ulazu u bubanj .....	25
3.2. Proces proračuna u VBA.....	26
3.2.1. Procedura: Promjena_opterećenja.....	27
3.2.2. Procedura: Hidraulički proračun.....	28
3.2.3. Prodedure: Uzlazna_Cijev_Prednja_strana, Uzlazna_Cijev_Bočne_strane, Uzlazna_Cijev_Stražnja_1_prolaza, Uzlazna_Cijev_Stražnja_strana_2_prolaz, Uzlazna_Cijev_Bočne_strane_2_prolaz, Uzlazna_Cijev_Nosece_cijevi.....	29
3.2.3.1. Funkcije za određivanje veličine stanja vode .....	29
3.2.3.2. Tijek procedura za proračun masenog protoka uzlaznih cijevi .....	30
3.2.3.3. Podrelaksacija .....	31
3.2.4. Procedura: Množitelji.....	31
3.2.4.1. Funkcija: izracunaj_r3 .....	32
4. ANALIZA PODATAKA.....	34

---

4.1. Maseni protoci.....	34
4.2. Veza između gustoće masenog toka, dovedene toplina po poprečnom presjeku cijevi i proizvedene pare .....	35
4.3. Međusobna veze proizvedene pare i dovedene topline.....	37
4.4. Pogreška u odnosu na proračun cijelog modela .....	38
4.5. Optočni broj .....	38
4.6. Padovi tlaka u silaznim i uzlaznim cijevima.....	40
4.6.1. Silazne cijevi .....	40
4.6.2. Uzlazne cijevi.....	42
5. ZAKLJUČAK.....	44
LITERATURA.....	45
PRILOZI.....	46

## POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz isparivačkog kruga.....	6
Slika 2. Shema generatora pare.....	9
Slika 3. Hijerarhijski dijagram procedura.....	19
Slika 4. Kod procedure "Promjena_opterećenja".....	20
Slika 5. Petlja procedure Hidraulički_proračun.....	21
Slika 6. Proračun masenog protoka uzlaznih cijevi prednje stranje ložišta.....	23
Slika 7. Veličine stanja za dobivanje vrijednosti množitelja i pozivanje same procedure.....	24
Slika 8. Procedura Množitelji.....	24
Slika 9. Linearna ovisnost množitelja o porastu udjela pare na zadanom tlaku.....	25
Slika 10. Funkcija za izračunavanje r3 interpolacijom.....	26
Slika 11. Ukupni maseni protok.....	27
Slika 12. Maseni protok pojedine skupine uzlaznih cijevi.....	27
Slika 13. Gustoće masenog toka uzlaznih cijevi.....	28
Slika 14. Omjer dovedene topline i površine ukupnog poprečnog prjesjeka cijevi.....	28
Slika 15. Maseni udio pare po pojedninoj skupini cijevi.....	29
Slika 16. Dovedena toplina po skupini cijevi.....	29
Slika 17. Proizvedena para po skupini cijevi.....	30
Slika 18. Relativna pogreška u odnosu na proračun cijelog postrojenja.....	30
Slika 19. Optočni broj.....	31
Slika 20. Optočni broj za dva puta veći radni tlak.....	31
Slika 21. Maseni protok za $p_{2B} = 2 \cdot p_B$ .....	32
Slika 22. Optočni broj za tri puta veći radni tlak.....	32
Slika 23. Promjena pada tlaka uslijed gravitacijskog utjecaja.....	33
Slika 24. Pad tlaka kao posljedica trenja u silaznim cijevima.....	33
Slika 25. Ukupni pad tlaka u silaznim cijevima.....	34
Slika 26. Pad tlaka uslijed gravitacijskog utjecaja.....	34
Slika 27. Pad tlaka uslijed trenja u uzlaznim cijevima.....	35

---

Slika 28. Pad tlaka uslijed akceleracijskog učinka u uzlaznim cijevima.....	35
---	----



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Ovisnost bezimenzijuskog faktora skliza $\gamma$ o tlaku.....	12
Tablica 2. Tablični prikaz promjene faktora $r_3$ promjenom tlaka i masenog udjela pare.....	13
Tablica 3. Promjena entalpije na tlaku zasićenja promjenom tlaka zasićenja.....	24
Tablica 4. "Ntab" za funkciju "Voda(Ntab, p, T)".....	29
Tablica 5. "Izas" za funkciju "Zas(Izas, p)".....	30

## POPIS OZNAKA

$m_1$	kg/s	Maseni protok silaznih cijevi
$m_2$	kg/s	Maseni protok uzlaznih cijevi prednje strane prvog prolaza
$m_3$	kg/s	Maseni protok uzlaznih cijevi bočnih strana prvog prolaza
$m_4$	kg/s	Maseni protok uzlaznih cijevi stražnje strane prvog prolaza
$m_5$	kg/s	Maseni protok uzlaznih cijevi bočnih strana drugog prolaza
$m_6$	kg/s	Maseni protok uzlaznih cijevi stražnje strane drugog prolaza
$m_7$	kg/s	Maseni protok nosećih cijevi
$\Delta p_1$	bar	Pad tlaka u silaznim cijevima
$\Delta p_{2,3,4,5,6,7}$	bar	Pad tlaka u uzlaznim cijevima
$p_B$	bar	Tlak u bubnju
$\rho_1$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća vode u silaznim cijevima
$T_1$	°C	Temperatura vode u silaznim cijevima
$T_{mv}$	°C	Temperatura napojne vode
$T'$	°C	Temperatura zasićenja vode na tlaku $p_B$
$\rho'_{2,3,4,5,6,7}$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća vode na temperaturi zasićenja u uzlaznim cijevima
$r_2$	-	Množitelj akceleracijskog učinka dvofaznog toka
$r_3$	-	Množitelj trenja dvofaznog toka
$r_4$	-	Množitelj gravitacijskog utjecaja dvofaznog toka
$G_{1,2,3,4,5,6,7}$	kg/(s m <sup>2</sup> )	Gustoća masenog toka
$q_{lož}$	W/m <sup>2</sup>	Toplinsko opterećenje ložišta
$q_{pz}$	W/m <sup>2</sup>	Toplinsko opterećenje prijelazne zone
$q_{pr}$	W/m <sup>2</sup>	Toplinsko opterećenje drugog prolaza
$H_{(2,3,4,5,6,7)e}$	m	Visina ekonomajzerskog dijela uzlaznih cijevi

$l_{(2,3,4,5,6,7)e}$	m	Duljina ekonomajzerskog dijela uzlaznih cijevi
$H_{(2,3,4,5,6,7)i}$	m	Visina isparivačkog dijela dijela uzlaznih cijevi
$l_{(2,3,4,5,6,7)i}$	m	Duljina isparivačkog dijela dijela uzlaznih cijevi
$d_{1,2,3,4,5,6,7}$	m	Promjer cijevi
$n_{1,2,3,4,5,6,7}$	-	Broj pojedine skupine cijevi
$O_{br}$	kg/kg	Optočni broj
$D$	kg	Proizvedena para
$x_{2,3,4,5,6,7}$	kg/kg	Maseni udio pare pojedine skupine uzlaznih cijevi
$\lambda_{1,2,3,4,5,6,7}$	-	Faktor trenja linijskih otpora strujanju
$\zeta_{1,2,3,4,5,6,7}$	-	Lokalni otpori strujanju
$\mu_1$	Pa s	Dinamički viskozitet vode silaznih cijevi
$\mu_{2,3,4,5,6,7}$	Pa s	Usrednjeni koeficijent dinamičkog viskoziteta pare i kapljevine
$Re_{1,2,3,4,5,6,7}$	-	Reynoldsov broj
$h_1$	J/(kg K)	Specifična entalpija silaznih cijevi
$h'_{2,3,4,5,6,7}$	J/(kg K)	Specifična entalpija vrele kapljevine uzlaznih cijevi
$h''_{2,3,4,5,6,7}$	J/(kg K)	Specifična entalpija suhozasićene pare uzlaznih cijevi
$\frac{dh'_{2,3,4,5,6,7}}{dp}$	J/(kg K Pa)	Promjena specifične entalpije vrele kapljevine zbog promjene tlaka
$\alpha$	-	Odnos specifičnih volumena parne i tekuće faze
$\gamma$	-	Faktor skilza
$v_1$	kg/m <sup>3</sup>	Specifični volumen vode silaznih cijevi
$v'_{2,3,4,5,6,7}$	kg/m <sup>3</sup>	Specifični volumen vrele kapljevine uzlaznih cijevi
$v''_{2,3,4,5,6,7}$	kg/m <sup>3</sup>	Specifični volumen suhozasićene pare uzlaznih cijevi

## **SAŽETAK**

U ovom radu napravljen je hidraulički proračun isparivačkog dijela generatora pare. Kao ulazni podaci koristili su se rezultati prethodno napravljenog termodinamičkog proračuna generatora pare. Za modeliranje pada tlaka u dvofaznom toku korištena je Thomova metoda. Proračun je napisan u VBA (Microsoft Visual Basic for Applications). Izračunat je optočni broj u rasponu opterećenja od 30% do 100%. Također je prikazana promjena optočnog broja u ovisnosti o radnom tlaku pare.

Ključne riječi: hidraulički proračun generatora pare, isparivački dio, stacionarna stanja, VBA, Thomova metoda.

## 1. UVOD

Cilj teksta je opisati i približiti provedeni proračun procesa proizvodnje pare u isparivačkom dijelu vertikalnog generatora pare s bubnjem NGP Rafinerije Sisak. Proveden je hidraulički proračun prirodne cirkulacije. Za modeliranje strujanja u uzlaznim cijevima, u kojima dolazi do pojave dvofaznog toka, korištena je Thomova metoda za proračun pada tlaka. Rubni uvjeti jednadžbi te neke potrebne veličine stanja hidrauličkog proračuna određeni su prethodno izrađenim matematičkim modelom NGP Rafinerija Sisak, jednadžbom kontinuiteta te uvjetom jednakosti padaova tlaka u uzlaznim i silaznim cijevima isparivača.

Thomova metoda daje relativno pouzdane rezultate u području tlakova od 1 do 220 bar i za vrijednosti gustoća masenog toka iznad  $5,8 \text{ kg/sm}^2$ . Područje proračun ispunjava oba uvjeta.

Proračun je pisan u VBA (Microsoft Visual Basic for Applications), iterativnog je karaktera i sadrži osam glavnih procedura.

Rad je podijeljen u 3 osnovna poglavlja poglavlja. U prvom se razradila teorijska pozadina problema. Nakon toga je opisan tijek proračuna kojim se došlo do traženih vrijednosti te na kraju provedena analiza rezultata.

## 2. TEORIJSKA POZADINA HIDRAULIČKOG PRORAČUNA

### 2.1. Fizikalni modeli strujanja

Strujanje tekućine i pare u isparivačkim cijevima predstavlja poseban fenomen čije razumijevanje zahtijeva poznavanje strukture i načina međusobnog djelovanja faza. Zbog kompleksnosti međusobnog djelovanja faza, fenomen se ne može obuhvatiti znanjima i iskustvom stečenim proučavanjem jednofaznog područja strujanja. U pokušaju da se matematičkim alatom opišu pojave u dvofaznom toku, neophodno je bilo primijeniti pojednostavljene fizikalne modele strujanja.

- Homogeni model:

Ovaj model predstavlja najjednostavniji pristup u analizi dvofaznog strujanja. Polazi se od pretpostavke da se dvofazni tok ponaša kao jednofazni čija se svojstva mogu izračunati interpolacijom svojstava tekuće i parne faze

- Model odvojenih tokova

Model se zasniva na pretpostavci o odvojenim tokovima parne i tekuće faze. Na taj se način mogu pisati jednačbe održanja mase, količine gibanja i energije potrebne za svaku fazu. Ovaj pristup zahtijeva, dodatno u odnosu na homogeni model, poznavanje protočnog presjeka faze kao i poznavanje interakcija između faza.

- Model temeljen na oblicima strujanja

Ovaj se model zasniva na temelju definiranja nekoliko osnovnih režima strujanja i izgradnji dvofaznog modela na temelju idealiziranih pretpostavki prilagođenih svakom režimu strujanja. Osnovne se jednačbe rješavaju u granicama pojedinog oblika.

## 2.2. Proračun pada tlaka po Thomovoj metodi

Proračun pada tlaka po Thomovoj metodi temelji se na modelu odvojenih tokova. Ukupni se pad tlaka, jednako kao i kod jednofaznog toka, može podijeliti na tri komponente:

- pad tlaka uslijed trenja,
- pad tlaka zbog gravitacijskog utjecaja,
- pad tlaka zbog akceleracijskog efekta.

$$\Delta p = \Delta p_{tr} + \Delta p_{ak} + \Delta p_{gr} \quad (1)$$

Thomova metoda je razvijena na temelju rezultata mjerenja dvofaznog toka vode u grijanim cijevima. Daje relativno pouzdane rezultate u području tlakova od 1 do 220 bar i za vrijednosti gustoća masenog toka iznad  $5.8 \text{ kg/sm}^2$ . Ona predstavlja napredak u odnosu na homogeni model utoliko što uzima u obzir mogućnost da brzina parne i tekuće faze budu različite kao i utjecaj masenog sadržaja pare na svaku od komponenata pada tlaka. Ovi utjecaji su obuhvaćeni množiteljima dvofaznog pada tlaka.

### 2.2.1. Akceleracijska komponenta pada tlaka

Pad tlaka kao posljedica akceleracije računa se kao onaj koji bi imala jednofazna kapljevina jednakog protoka s toplinskim stanjem na granici zasićenja, pomnožen množiteljem dvofaznog trenja  $r_2$

$$\Delta p_{ak} = \left( \frac{m}{A \cdot n} \right)^2 \cdot v' \cdot r_2 \quad (2)$$

Rezultati mjerenja za  $r_2 = r_2(p, x_i)$  korelirani su na sljedeći način:

$$r_2 = \left[ 1 + x_i \cdot (\gamma - 1) \right] \cdot \left( 1 + x_i \cdot \frac{\alpha - \gamma}{\gamma} \right) - 1 \quad (3)$$

$\alpha$  predstavlja odnos specifičnih volumena parne i kapljevite faze, dok  $\gamma$  predstavlja bezdimenzijskog faktora skliza.

$$\alpha = \frac{v''}{v'} \quad (4)$$

Vrijednosti za  $\gamma$  mogu se pronaći u sljedećoj tablici:

Tablica 1. Ovisnost bezimenzijuskog faktora skliza  $\gamma$  o tlaku

Tlak, bar	1	17	41	86	175	207	221
$\gamma$	246	40	20	9,8	4,95	2 15	1

### 2.2.2. Pad tlaka uslijed trenja na stijenci i lokalnih otpora

Pad tlaka uslijed trenja na stijenci i lokalnih otpora računa se kao onaj koji bi imala jednofazna kapljevina jednakog protoka s toplinskim stanjem na granici zasićenja, pomnožen množiteljem dvofaznog trenja  $r_3$ .

$$\Delta p_{tr} = \left( \lambda \cdot \frac{l}{d} + \Sigma \zeta \right) \cdot \frac{v'}{2} \cdot \left( \frac{m}{A \cdot n} \right)^2 \cdot r_3 \quad (5)$$

$r_3$  je funkcija tlaka i masenog sadržaja pare na izlazu. Međutim zbog karaktera izmjerenih vrijednosti, nije bilo moguće aproksimirati na prikladan način, tako da je  $r_3$  dan slikom tabličnog prikazom broj taj i taj.



Tablica 2. Tablični prikaz promjene faktora  $r_3$  promjenom tlaka i masenog udjela pare

$x_i$	Tlak, bar				
	17	41	86	145	207
0	1,00	1,00	1,00		
0,01	1,49	1,11	1,03		
0,015	1,76	1,25	1,05		
0,02	2,05	1,38	1,08	1,02	
0,03	2,63	1,62	1,15	1,05	
0,04	3,19	1,86	1,23	1,07	
0,05	3,71	2,09	1,31	1,10	
0,06	4,21	2,3	1,40	1,12	
0,07	4,72	2,5	1,48	1,14	
0,08	5,25	2,7	1,56	1,16	1,04
0,09	5,78	2,9	1,64	1,19	1,05
0,10	6,30	3,11	1,71	1,21	1,06
0,15	9,00	4,11	2,10	1,33	1,09
0,2	11,4	5,08	2,47	1,46	1,12
0,3	16,2	7,00	3,20	1,72	1,18
0,4	21,0	8,80	3,89	2,01	1,26
0,5	25,9	10,6	4,55	2,32	1,33
0,6	30,5	12,4	5,25	2,62	1,41
0,7	35,2	14,2	6,00	2,93	1,50
0,8	40,1	16,0	6,75	3,23	1,58
0,9	45,0	17,8	7,5	3,53	1,66
1,0	49,93	19,65	8,165	3,832	1,740

### 2.2.3. Pad tlaka uslijed gravitacijskog utjecaja

Gravitacijski utjecaj na pad tlaka u dvofaznom tok uzet je u obzir preko množitelja  $r_4$ :

$$\Delta p_{gr} = \frac{g \cdot h}{v} \cdot r_4 \quad (6)$$

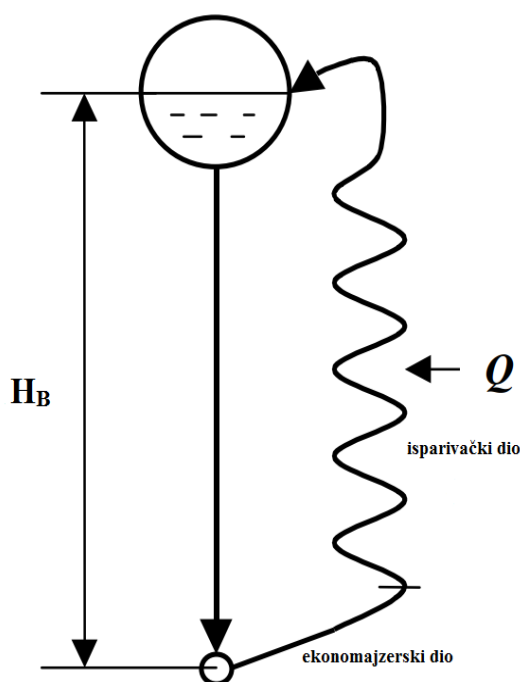
Pri čemu se  $r_4$  može izraziti kao:

$$r_4 = \frac{\frac{\gamma}{\alpha} - 1}{\gamma - 1} - \frac{\gamma - \frac{\gamma}{\alpha}}{(\gamma - 1)^2} \cdot \frac{\ln[1 + x_i(\gamma - 1)]}{x_i} \quad (7)$$

### 2.3. Hidraulički proračun prirodne cirkulacije

Prirodna cirkulacija u generatorima pare s bubnjem uzrokovana je razlikom gustoća kapljevina u silaznim cijevima i dvofaznog toka kapljevine i pare u uzlaznim cijevima. Razlika gustoća uslijed razlike visina između bubnja i kolektora stvara uzgonsku silu koja uzrokuje cirkulaciju vode.

Uzlazne cijevi čine ekrani ložišta te cijevi konvektivnog kanala. Prirodna cirkulacija je nužan uvjet za pravilno funkcioniranje ovih tipova generatora jer se cijevi hlade protokom vode i sprečavaju pojavu pregaranja cijevi. Zadatak proračuna je određivanje spomenutog protoka vode.



Slika 1. Shematski prikaz isparivačkog kruga

Pad tlaka u silaznim cijevima jednak je padu tlaka u uzlaznim cijevima:

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 \quad (8)$$

Maseni protok u silaznim cijevima jedan je sumi svih masenih protoka u uzlaznim cijevima:

$$m_1 = m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7 \quad (9)$$

### 2.3.1. Pad tlaka u silaznim cijevima

Pad tlaka uslijed akceleracijskog učinka možemo zanemariti pošto silazne cijevi nisu grijane te stoga ne dolazi do promjene specifičnog volumena vode. Tako da za pad tlaka u silaznim cijevima vrijedi sljedeći izraz:

$$\Delta p_1 = \Delta p_{1gr} + \Delta p_{1tr} \quad (10)$$

Pad tlaka zbog gravitacijskog utjecaja raste u smjeru strujanja, dok je pad tlaka uslijed trenja i lokalnih otpora negativan.

Spomenuti članovi pada tlaka u silaznim cijevima jednaki su izrazima:

$$\Delta p_{1gr} = \rho_1 \cdot g \cdot h \quad (11)$$

$$\Delta p_{1tr} = - \left( \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} + \Sigma \zeta_1 \right) \cdot \frac{v_1}{2} \cdot \left( \frac{m_1}{A_1 \cdot n_1} \right) \quad (12)$$

### 2.3.2. Pad tlaka u uzlaznim cijevima

Budući da je voda u donjem dijelu kolektora pothlađena, to će zahtijevati podijelu isparivačkih cijevi na dva dijela:

- U ekonomajzerskom dijelu uzlaznih cijevi voda se zagrijava do temperature zasićenja. Još nema pojave parne faze pa se koristi model jednofaznog toka. Postoji akceleracijski utjecaj na pad tlaka jer dolazi do promjene specifičnog volumena uslijed zagrijavanja vode.
- U isparivačkom dijelu voda se zagrijava od vrele kapljevine do nekog stanja mokre pare. Pojavom parne faze koristi se model dvofaznog toka.

Ukupni pad tlaka u uzlaznim cijevima jednak je sumi pada tlaka u ekonomajzerskom i isparivačkom dijelu:

$$\Delta p_2 = \Delta p_{2tr} + \Delta p_{2gr} + \Delta p_{2ak} \quad (13)$$

Pojedini članovi prikazane jednačbe jednaki su izrazima:

$$\Delta p_{2tr} = \left[ \left( \lambda_2 \cdot \frac{l_{2e}}{d_2} + \Sigma \zeta_{2e} \right) \cdot \frac{v_{2e}}{2} + \left( \lambda_2 \cdot \frac{l_{2i}}{d_2} + \Sigma \zeta_{2i} \right) \cdot \frac{v_2'}{2} \cdot r_3 \right] \cdot \left( \frac{m_2}{A_2 \cdot n_2} \right)^2 \quad (14)$$

$$\Delta p_{2ak} = \left( \frac{m_2}{A_2 \cdot n_2} \right)^2 \cdot \left[ (v_2' - v_{2e}) + v_2' \cdot r_2 \right] \quad (15)$$

$$\Delta p_{2gr} = (\rho_{2e} \cdot h_{2e} + \rho_2' \cdot h_{2i} \cdot r_4) \cdot g \quad (16)$$

## 2.4. Optočni broj

Optočni broj je značajna varijabla pri konstruiranju generatora pare prirodne i prisilne cirkulacije. Definiran je kao omjer protoka vode koja se cirkulira u isparivaču i proizvedene pare.

$$O_{br} = \frac{m_1}{D} \quad (17)$$

Varijacije u omjeru optočnog broja proizlaze iz razine tlaka generatora pare. Tako visokotlačni generatori pare imaju mali optočni broj, a niskotlačni generatori pare visok optočni broj. Ostali parametri koji utječu na optočni broj su visina generatora pare, toplinsko opterećenje, te razlike u dimenzijama silaznih i uzlaznih cijevi.

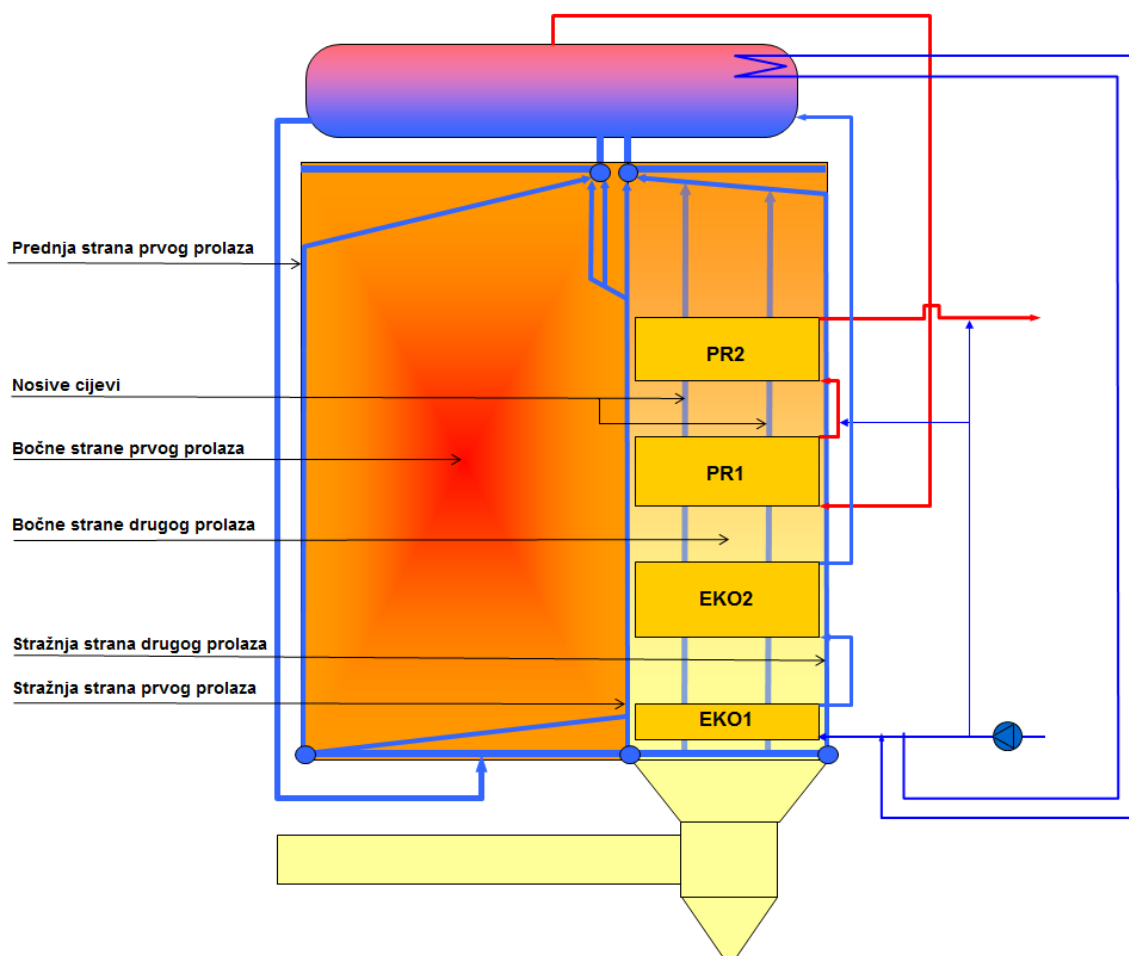
Optočni broj generatora pare sa prirodnom cirkulacijom kreće se između 5 i 100.0

### 3. HIDRAULIČKI PRORAČUN CIRKULACIJE VODE U ISPARIVAČU GENERATORA PARE

U zadatku je potrebno proračunati cirkulaciju vode u isparivaču generatora pare kapaciteta 50 t/h u ovisnosti o opterećenju generatora pare koji se kreće od 30% do 100%. U radu treba koristiti prethodno napravljen termodinamički proračun generatora pare.

Postupak proračuna je nužno iterativan. Zbog velikog broja iteracija koristi se računalni alat čijom manipulacijom se omogućuje rješavanje problema u realnom roku. Spomenuti alat je VBA(Microsoft Visual Basic for Applications).

#### 3.1. Postavljanje problema



Slika 2. Shema generatora pare

Iparivački dio kruga generatora pare sastoji se od velikog broja cijevi koje možemo podijeliti u dvije grupe: silazne i uzlazne cijevi. Silazne cijevi su smještene s vanjske strane ložišta i nisu grijane. Uzlazne cijevi čine ekrani ložišta te cijevi u konvektivnom kanalu generatora pare. Toplina im se dovodi zračenjem plamena i konvekcijom u ložištu, te konvekcijom dimnim plinovima u konvektivnom dijelu. Uzlazne cijevi su podijeljene prema geometrijski zajedničkim karakteristikama. Tako podijeljene čine 6 skupina cijevi:

- Prednju stranu prvog prolaza, čije su pripadajuće veličine označene indeksom 2,
- Bočne strane prvog prolaza, čije su pripadajuće veličine označene indeksom 3,
- Stražnja strana prvog prolaza, čije su pripadajuće veličine označene indeksom 4,
- Bočne strane drugog prolaza, čije su pripadajuće veličine označene indeksom 5,
- Stražnja strana drugog prolaza, čije su pripadajuće veličine označene indeksom 6,
- Nosive cijevi, označene indeksom 7.

### 3.1.1. *Pretpostavke u modelu*

#### 3.1.1.1. *Gustoća toplinskog toka*

Zbog problema određivanja raspodjele gustoće toplinskog toka izgaranja dimnih plinova u ložištu pretpostavljena je jednolika raspodjela. U konvektivnom kanalu gustoće toplinskog toka su podijeljene na dva dijela (dvije vrijednosti). Gustoće toplinskih tokova su dobivene kao omjeri ukupne predane topline i ukupne površine pojedine zone:

- Gustoća toplinskog toka ložišta:

$$q_{lo\dot{z}} = \frac{\Phi_{lo\dot{z}}}{A_{lo\dot{z}}} \quad (18)$$

- Gustoća toplinskog toka u prijelaznoj zoni konvektivnog kanala:

$$q_{pz} = \frac{\Phi_{pz}}{A_{pz}} \quad (19)$$

- Gustoća toplinskog toka u prolazu konvektivnog kanala:

$$q_{pr} = \frac{\Phi_{pr}}{A_{pr}} \quad (20)$$

### 3.1.1.2. Temperatura vode u silaznim cijevima

Kako u bubnju dolazi do miješanja pothlađene napojne vode i vrele vode koja se dovodi iz isparivačkog kruga, rezultat miješanja je pothlađena kapljevina. Pretpostavljeno je idealno miješanje vrele vode i pothlađene napojne vode na samom ulazu u silazne cijevi:

$$g_{nv} \cdot c_{nv} \cdot T_{nv} + g_B \cdot c_B \cdot T_B = g_1 \cdot h_1 \cdot T_1 \quad (21)$$

Pod pretpostavkom da je  $c_{nv} = c_B = c_1$  te uvrštavanjem  $g_{nv} = \frac{D}{m_1}$ ,  $g_B = \frac{m_1 - D}{D}$ , i  $O_{br} = \frac{m_1}{D}$

možemo izraziti temperaturu u silaznim cijevima kao:

$$T_1 = T' + \frac{1}{O_{br}} \cdot (T' - T_{nv}) \quad (22)$$

### 3.1.1.3. Koeficijenti trenja dvofaznog toka

Za turbulentni režim strujanja koristi se Fanningova korelacije faktora trenja i Reynoldsovog broja. Pa za turbulentni režima strujanja pri Reynoldsovim brojevima većim od 4000 vrijedi:

- Za jednofazni tok:

$$f_{1f} = 0.046 \cdot \text{Re}^{-0.2} \quad (23)$$

$$\lambda_1 = 4 \cdot f_{1f} \quad (24)$$

- Za dvofazni tok

$$f_{2f} = 0.46 \cdot \text{Re}_{2f}^{-0.2} \quad (25)$$

$$\lambda_2 = 4 \cdot f_{2f} \quad (26)$$

Reynoldsov broj za dvofazni tok dobiva se usrednjavanjem koeficijenata dinamičkog viskoziteta parne i kapljevite faze:

---

$$\text{Re}_{2f} = \frac{d \cdot G}{\mu_{2f}} \quad (27)$$

$$\frac{1}{\mu_{2f}} = \frac{1}{\mu'} \cdot \left[ 1 + x \cdot \left( \frac{\mu'}{\mu''} - 1 \right) \right] \quad (28)$$



### 3.1.2. Ključne jednadžbe

#### 3.1.2.1. Jednadžbe masenog protoka silaznih i uzlaznih cijevi

Prvo su postavljene jednadžbe pada tlaka za svaku skupinu cijevi:

Silazne cijevi:

$$\Delta p_1 = \rho_1 \cdot g \cdot h_1 - \left( \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} + \Sigma \zeta_1 \right) \cdot \frac{v_1}{2} \cdot \left( \frac{m_1}{A_1 \cdot n_1} \right)^2 \quad (29)$$

Uzlazne cijevi prednje strane prvog prolaza:

$$\Delta p_2 = \left\{ \left[ \left( \lambda_2 \cdot \frac{l_{2e}}{d_2} + \Sigma \zeta_{2e} \right) \cdot \frac{v_{2e}}{2} + \left( \lambda_2 \cdot \frac{l_{2i}}{d_2} + \Sigma \zeta_{2i} \right) \cdot \frac{v_2'}{2} \cdot r_3 \right] + \left[ (v_2' - v_{2e}) + v_2' \cdot r_2 \right] \right\} \cdot \left( \frac{m_2}{A_2 \cdot n_2} \right)^2 + (\rho_{2e} \cdot h_{2e} + \rho_2' \cdot h_{2i} \cdot r_4) \cdot g \quad (30)$$

Uzlazne cijevi bočnih strana prvog prolaza:

$$\Delta p_3 = \left\{ \left[ \left( \lambda_3 \cdot \frac{l_{3e}}{d_3} + \Sigma \zeta_{3e} \right) \cdot \frac{v_{3e}}{2} + \left( \lambda_3 \cdot \frac{l_{3i}}{d_3} + \Sigma \zeta_{3i} \right) \cdot \frac{v_3'}{2} \cdot r_3 \right] + \left[ (v_3' - v_{3e}) + v_3' \cdot r_2 \right] \right\} \cdot \left( \frac{m_3}{A_3 \cdot n_3} \right)^2 + (\rho_{3e} \cdot h_{3e} + \rho_3' \cdot h_{3i} \cdot r_4) \cdot g \quad (31)$$

Uzlazne cijevi stražnje strane prvog prolaza:

$$\Delta p_4 = \left\{ \left[ \left( \lambda_4 \cdot \frac{l_{4e}}{d_4} + \Sigma \zeta_{4e} \right) \cdot \frac{v_{4e}}{2} + \left( \lambda_4 \cdot \frac{l_{4i}}{d_4} + \Sigma \zeta_{4i} \right) \cdot \frac{v_4'}{2} \cdot r_3 \right] + \left[ (v_4' - v_{4e}) + v_4' \cdot r_2 \right] \right\} \cdot \left( \frac{m_4}{A_4 \cdot n_4} \right)^2 + (\rho_{4e} \cdot h_{4e} + \rho_4' \cdot h_{4i} \cdot r_4) \cdot g \quad (32)$$

Uzlazne cijevi bočnih strana drugog prolaza:

$$\Delta p_5 = \left\{ \left[ \left( \lambda_5 \cdot \frac{l_{5e}}{d_5} + \Sigma \zeta_{5e} \right) \cdot \frac{v_{5e}}{2} + \left( \lambda_5 \cdot \frac{l_{5i}}{d_5} + \Sigma \zeta_{5i} \right) \cdot \frac{v_5'}{2} \cdot r_3 \right] + \left[ (v_5' - v_{5e}) + v_5' \cdot r_2 \right] \right\} \cdot \left( \frac{m_5}{A_5 \cdot n_5} \right)^2 + (\rho_{5e} \cdot h_{5e} + \rho_5' \cdot h_{5i} \cdot r_4) \cdot g \quad (33)$$

Uzlazne cijevi stražnje strane drugog prolaza:

$$\Delta p_6 = \left\{ \left[ \left( \lambda_6 \cdot \frac{l_{6e}}{d_6} + \Sigma \zeta_{6e} \right) \cdot \frac{v_{6e}}{2} + \left( \lambda_6 \cdot \frac{l_{6i}}{d_6} + \Sigma \zeta_{6i} \right) \cdot \frac{v_6'}{2} \cdot r_3 \right] + \left[ (v_6' - v_{6e}) + v_6' \cdot r_2 \right] \right\} \cdot \left( \frac{m_6}{A_6 \cdot n_6} \right)^2 + (\rho_{6e} \cdot h_{6e} + \rho_6' \cdot h_{6i} \cdot r_4) \cdot g \quad (34)$$

Uzlazne nosive cijevi:

$$\Delta p_7 = \left\{ \left[ \left( \lambda_7 \cdot \frac{l_{7e}}{d_7} + \Sigma \zeta_{7e} \right) \cdot \frac{v_{7e}}{2} + \left( \lambda_7 \cdot \frac{l_{7i}}{d_7} + \Sigma \zeta_{7i} \right) \cdot \frac{v_7'}{2} \cdot r_3 \right] + \left[ (v_7' - v_{7e}) + v_7' \cdot r_2 \right] \right\} \cdot \left( \frac{m_7}{A_7 \cdot n_7} \right)^2 + (\rho_{7e} \cdot h_{7e} + \rho_7' \cdot h_{7i} \cdot r_4) \cdot g \quad (35)$$

Izrazi za maseni protok uzlaznih izvedeni su iz navedenih izraza za pad tlaka i uvjeta jednakosti pada tlaka (36) u uzlaznim i silaznim cijevima. Tako su izvedeni izrazi za masene protoke u uzlaznim cijevima, a maseni protok u silaznim cijevima jednak je sumi svih masenih protoka u uzlaznim cijevima.

$$m_2 = \sqrt{\frac{\rho_1 \cdot g \cdot h_1 - \left( \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} + \Sigma \zeta_1 \right) \cdot \frac{v_1}{2} \cdot \left( \frac{m_1}{A_1 \cdot n_1} \right)^2 - (\rho_{2e} \cdot h_{2e} + \rho_2' \cdot h_{2i} \cdot r_4) \cdot g}{\left\{ \left[ \left( \lambda_2 \cdot \frac{l_{2e}}{d_2} + \Sigma \zeta_{2e} \right) \cdot \frac{v_{2e}}{2} + \left( \lambda_2 \cdot \frac{l_{2i}}{d_2} + \Sigma \zeta_{2i} \right) \cdot \frac{v_2'}{2} \cdot r_3 \right] + \left[ (v_2' - v_{2e}) + v_2' \cdot r_2 \right] \right\}}} \cdot A_2 \cdot n_2 \quad (37)$$

$$m_3 = \sqrt{\frac{\rho_1 \cdot g \cdot h_1 - \left( \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} + \Sigma \zeta_1 \right) \cdot \frac{v_1}{2} \cdot \left( \frac{m_1}{A_1 \cdot n_1} \right)^2 - (\rho_{3e} \cdot h_{3e} + \rho_3' \cdot h_{3i} \cdot r_4) \cdot g}{\left\{ \left[ \left( \lambda_3 \cdot \frac{l_{3e}}{d_3} + \Sigma \zeta_{3e} \right) \cdot \frac{v_{3e}}{2} + \left( \lambda_3 \cdot \frac{l_{3i}}{d_3} + \Sigma \zeta_{3i} \right) \cdot \frac{v_3'}{2} \cdot r_3 \right] + \left[ (v_3' - v_{3e}) + v_3' \cdot r_2 \right] \right\}}} \cdot A_3 \cdot n_3 \quad (38)$$

$$m_4 = \sqrt{\frac{\rho_1 \cdot g \cdot h_1 - \left( \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} + \Sigma \zeta_1 \right) \cdot \frac{v_1}{2} \cdot \left( \frac{m_1}{A_1 \cdot n_1} \right)^2 - (\rho_{4e} \cdot h_{4e} + \rho'_4 \cdot h_{4i} \cdot r_4) \cdot g}{\left\{ \left[ \left( \lambda_4 \cdot \frac{l_{4e}}{d_4} + \Sigma \zeta_{4e} \right) \cdot \frac{v_{4e}}{2} + \left( \lambda_4 \cdot \frac{l_{4i}}{d_4} + \Sigma \zeta_{4i} \right) \cdot \frac{v'_4}{2} \cdot r_3 \right] + \left[ (v'_4 - v_{4e}) + v'_4 \cdot r_2 \right] \right\}}} \cdot A_4 \cdot n_4 \quad (39)$$

$$m_2 = \sqrt{\frac{\rho_1 \cdot g \cdot h_1 - \left( \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} + \Sigma \zeta_1 \right) \cdot \frac{v_1}{2} \cdot \left( \frac{m_1}{A_1 \cdot n_1} \right)^2 - (\rho_{5e} \cdot h_{5e} + \rho'_5 \cdot h_{5i} \cdot r_4) \cdot g}{\left\{ \left[ \left( \lambda_5 \cdot \frac{l_{5e}}{d_5} + \Sigma \zeta_{5e} \right) \cdot \frac{v_{5e}}{2} + \left( \lambda_5 \cdot \frac{l_{5i}}{d_5} + \Sigma \zeta_{5i} \right) \cdot \frac{v'_5}{2} \cdot r_3 \right] + \left[ (v'_5 - v_{5e}) + v'_5 \cdot r_2 \right] \right\}}} \cdot A_5 \cdot n_5 \quad (40)$$

$$m_6 = \sqrt{\frac{\rho g h - \left( \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} + \Sigma \zeta_1 \right) \cdot \frac{v_1}{2} \cdot \left( \frac{m_1}{A_1 \cdot n_1} \right)^2 - (\rho_{6e} \cdot h_{6e} + \rho'_6 \cdot h_{6i} \cdot r_4) \cdot g}{\left\{ \left[ \left( \lambda_6 \cdot \frac{l_{6e}}{d_6} + \Sigma \zeta_{6e} \right) \cdot \frac{v_{6e}}{2} + \left( \lambda_6 \cdot \frac{l_{6i}}{d_6} + \Sigma \zeta_{6i} \right) \cdot \frac{v'_6}{2} \cdot r_3 \right] + \left[ (v'_6 - v_{6e}) + v'_6 \cdot r_2 \right] \right\}}} \cdot A_6 \cdot n_6 \quad (41)$$

$$m_7 = \sqrt{\frac{\rho_1 \cdot g \cdot h_1 - \left( \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} + \Sigma \zeta_1 \right) \cdot \frac{v_1}{2} \cdot \left( \frac{m_1}{A_1 \cdot n_1} \right)^2 - (\rho_{7e} \cdot h_{7e} + \rho'_7 \cdot h_{7i} \cdot r_4) \cdot g}{\left\{ \left[ \left( \lambda_7 \cdot \frac{l_{7e}}{d_7} + \Sigma \zeta_{7e} \right) \cdot \frac{v_{7e}}{2} + \left( \lambda_7 \cdot \frac{l_{7i}}{d_7} + \Sigma \zeta_{7i} \right) \cdot \frac{v'_7}{2} \cdot r_3 \right] + \left[ (v'_7 - v_{7e}) + v'_7 \cdot r_2 \right] \right\}}} \cdot A_7 \cdot n_7 \quad (42)$$

Izraz za maseni protok kroz silazne cijevi proizlazi iz jednadžbe kontinuiteta za sve isparivačke cijevi

$$m_1 = m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7$$

(9):

$$m_1 = m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7 \quad (43)$$

### 3.1.2.2. Određivanje visine ekonomajzerskog dijela isparivačkih cijevi $H_e$

Budući da silazne cijevi nisu grijane, a u bubnju dolazi do miješanja zasićene vode i napojne vode, u silaznim cijevima struji pothlađena voda. U uzlaznim cijevima, pod djelovanjem toplinskog opterećenja, voda će zagrijati do temperature zasićenja nakon što prijeđe određeni put.

Izraz za visinu ekonomajzerskog dijela generatora pare:

$$H_e = \frac{\Delta h + \frac{dh'}{dp} \cdot \left( H - \frac{\Delta p_{tr,sil}}{\rho' \cdot g} \right)}{\frac{dh'}{dp} \cdot \rho' \cdot g + \frac{4 \cdot q_e}{G \cdot d_e}} \quad (44)$$

$-\Delta h_B$  predstavlja razliku entalpija između pothlađene vode i vrele kapljevine

$-\frac{dh'}{dp}$  predstavlja promjenu entalpije vrele kapljevine promjenom tlaka

$-q_e$  predstavlja gustoću toplinskog toka na ekonomajzerskom području

Zbog pretpostavke od jednolikoj raspodjeli toplinskog toka u zoni isparivača i konvektivnoj zoni vrijedi:

- Prednja strana i bočne strane prvog prolaza:

$$q_e = q_{lož} \quad (45)$$

- Stražnja strana prvog prolaza:

$$q_e = q_{lož} + q_{pr} \quad (46)$$

- Bočne strane, stražnja strana drugog prolaza te nosive cijevi

$$q_e = q_{pr} \quad (47)$$

Član  $\frac{dh'}{dp}$  određen je derivacijom jednadžbe koja je dobivena "fittingom krivulje" promjene specifične entalpije vrele kapljevine za raspon tlakova od 10 bar do 60 bar s korakom od 5 bara.

Tablica 3. Promjena entalpije na tlaku zasićenja promjenom tlaka zasićenja

$p \text{ (Pa)}$	$h' \text{ (kJ/(kgK))}$
1000000	762
1200000	798
1400000	830
1600000	859
1800000	885
2000000	909
2500000	962
3000000	1008

4000000	1088
5000000	1155
6000000	1214

$$h'(p) = 2,1539 \cdot 10^{-18} p^3 - 3,2533 \cdot 10^{-11} \cdot p^2 + 0,00022 \cdot p + 571$$

(48)

$$\frac{dh'}{dp} = 6,46172 \cdot 10^{-18} \cdot p^2 - 6,50659 \cdot 10^{-11} \cdot p + 0,000225$$

(49)

Stoga za pojedinu skupinu cijevi možemo pisati:

$$H_{2e} = \frac{\Delta h_2 + \left. \frac{dh'}{dp} \right|_{p=p_2'} \cdot \left( H_B - \frac{\Delta p_{tr1}}{\rho_2' \cdot g} \right)}{\left. \frac{dh'}{dp} \right|_{p=p_2'} \cdot \rho_2' \cdot g + \frac{4 \cdot q_{loz}}{G_2 \cdot d_2}} \quad (50)$$

$$H_{3e} = \frac{\Delta h_3 + \frac{dh'}{dp} \Big|_{p=p_3} \cdot \left( H_B - \frac{\Delta p_{tr1}}{\rho_3' \cdot g} \right)}{\frac{dh'}{dp} \Big|_{p=p_3} \cdot \rho_3' \cdot g + \frac{4 \cdot q_{loz}}{G_3 \cdot d_3}} \quad (51)$$

$$H_{4e} = \frac{\Delta h_4 + \frac{dh'}{dp} \Big|_{p=p_4} \cdot \left( H_B - \frac{\Delta p_{tr1}}{\rho_4' \cdot g} \right)}{\frac{dh'}{dp} \Big|_{p=p_4} \cdot \rho_4' \cdot g + \frac{4 \cdot (q_{loz} + q_{pr})}{G_4 \cdot d_4}} \quad (52)$$

$$H_{5e} = \frac{\Delta h_2 + \frac{dh'}{dp} \Big|_{p=p_5} \cdot \left( H_B - \frac{\Delta p_{tr1}}{\rho_5' \cdot g} \right)}{\frac{dh'}{dp} \Big|_{p=p_5} \cdot \rho_5' \cdot g + \frac{4 \cdot q_{pr}}{G_5 \cdot d_5}} \quad (53)$$

$$H_{6e} = \frac{\Delta h_6 + \frac{dh'}{dp} \Big|_{p=p_6} \cdot \left( H_B - \frac{\Delta p_{tr1}}{\rho_6' \cdot g} \right)}{\frac{dh'}{dp} \Big|_{p=p_6} \cdot \rho_6' \cdot g + \frac{4 \cdot q_{pr}}{G_6 \cdot d_6}} \quad (54)$$

$$H_{7e} = \frac{\Delta h_7 + \frac{dh'}{dp} \Big|_{p=p_7} \cdot \left( H_B - \frac{\Delta p_{tr1}}{\rho_7' \cdot g} \right)}{\frac{dh'}{dp} \Big|_{p=p_7} \cdot \rho_7' \cdot g + \frac{4 \cdot q_{pr}}{G_7 \cdot d_7}} \quad (55)$$

### 3.1.2.3. Udio pare pojedine skupine cijevi na ulazu u bubanj

Proračun pada tlaka u uzlaznim cijevima zasniva se na Thomovoj metodi. Ona se temelji na množenju jednadžbi za pad tlaka jednofaznog strujanja množiteljima dvofaznog pada tlaka  $r_2$ ,  $r_3$  i  $r_4$ . Množitelji su prikazani kao funkcija tlaka zasićenja i masenog udjela pare na ulazu u bubanj. Shodno tome je potrebno odrediti udio pare. Iz jednadžbe za specifičnu entalpiju mokre pare  $h = h' + x_i \cdot (h'' + h')$  i jednadžbe očuvanja energije  $h = \frac{q \cdot A}{m} + h_1$  proizlaze jednadžbe masenog udjela pare za uzlazne cijevi:

$$x_2 = \frac{\left( \frac{q_{loz} \cdot A_2}{m_2} + h_1 - h_2' \right)}{\left( h_2'' - h_2' \right)} \quad (56)$$

$$x_3 = \frac{\left( \frac{q_{loz} \cdot A_3}{m_3} + h_1 - h_3' \right)}{\left( h_3'' - h_3' \right)} \quad (57)$$

$$x_4 = \frac{\left( \frac{q_{loz} \cdot A_4 + q_{pz} \cdot A_{4pz} + q_{pr} \cdot A_{4pr}}{m_4} + h_1 - h_4' \right)}{\left( h_4'' - h_4' \right)} \quad (58)$$

$$x_5 = \frac{\left( \frac{q_{pz} \cdot A_{5pz} + q_{pr} \cdot A_{5pr}}{m_5} + h_1 - h_5' \right)}{\left( h_5'' - h_5' \right)} \quad (59)$$

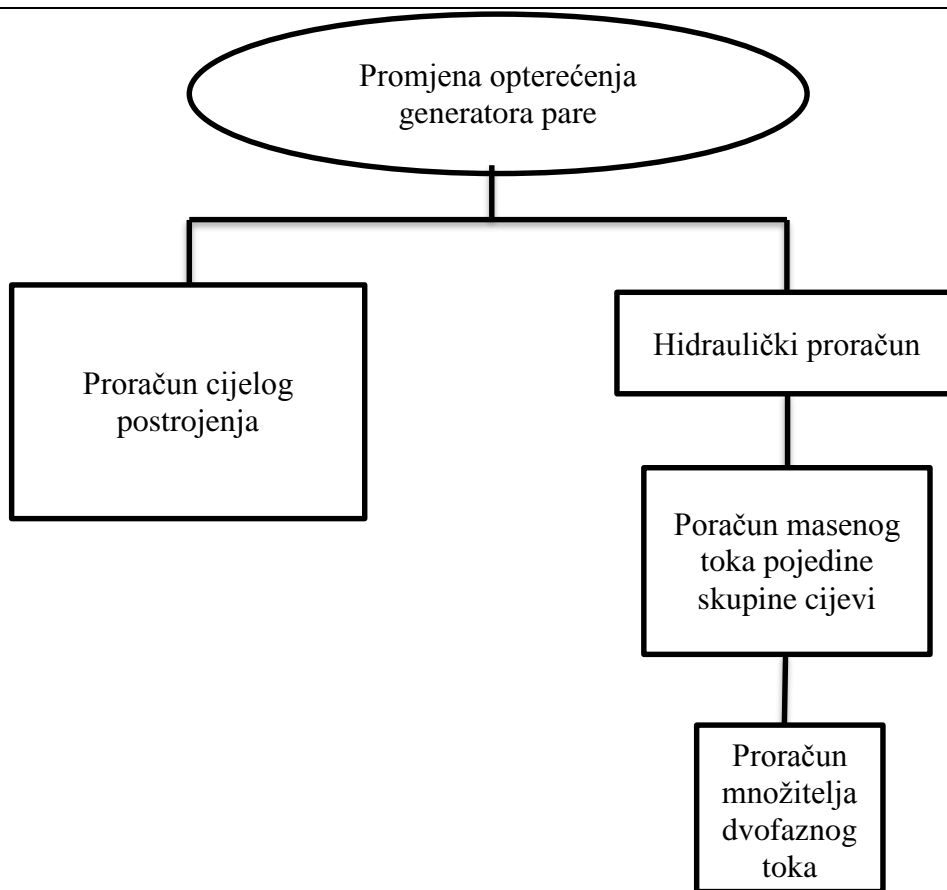
$$x_6 = \frac{\left( \frac{q_{pz} \cdot A_{6pz} + q_{pr} \cdot A_{6pr}}{m_6} + h_1 - h_6' \right)}{\left( h_6'' - h_6' \right)} \quad (60)$$

$$x_7 = \frac{\left( \frac{q_{pz} \cdot A_{7pz} + q_{pr} \cdot A_{7pr}}{m_7} + h_1 - h_7' \right)}{\left( h_7'' - h_7' \right)} \quad (61)$$

### 3.2. Proces proračuna u VBA

Kako je cilj završnog rada odrediti cirkulaciju vode u isparivaču generatora pare kapaciteta 50 t/h u ovisnosti o opterećenju generatora pare koji se kreće od 30% do 50 %, kod programiranja treba sadržavati i prethodno napravljen termodinamički proračun generatora pare zbog promjene veličina stanja vode i pare prilikom promjene opterećenja.

Korištene procedure mogu se podijeliti hijerarhijski. Hijerarhijski najviša procedura u sebi sadržava sve ostale procedure. Prema spomenutom, napisani kod koji se koristi za računanje problema ima oblik:



Slika 3. Hijerarhijski dijagram procedura

### 3.2.1. Procedura: Promjena\_opterećenja

```

Sub Promjena_opterećenja()

j = 0
For ii = 15 To 50 Step 5
j = j + 1

  Sheets("NGP Rafinerija shema").Range("An13") = ii
  NGP_Rafinerija_Sisak

  Sheets("opt_broj").Cells(j + 5, 2) = para_proizv * 3.6
  Sheets("opt_broj").Cells(j + 5, 3) = Qw(Nl) / Fc(Nl)
  Sheets("opt_broj").Cells(j + 5, 4) = Qw(Npz) / Fc(Npz)
  Sheets("opt_broj").Cells(j + 5, 5) = Qw(N2pz) / Fc(N2pz)

Hidraulički_proračun

'-----
'ISPIS PODATAKA
  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8) = ii
  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8 + 1) = m1
  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8 + 2) = m2
  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8 + 3) = m3
  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8 + 4) = m4
  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8 + 5) = m5
  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8 + 6) = m6
  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8 + 7) = m7
  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8 + 9) = para_proizv * 3.6
  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8 + 8) = m2 * x_i2 + m3 * x_i3 + m4 * x_i4 + m5 * x_i5 + m6 * x_i6 + m7 * x_i7

  .....

  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8 + 59) = qkg4 * m4 / (A4 * n4)
  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8 + 60) = qkg5 * m5 / (A5 * n5)
  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8 + 61) = qkg6 * m6 / (A6 * n6)
  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8 + 62) = qkg7 * m7 / (A7 * n7)
  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8 + 63) = T_B
  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8 + 64) = T_1
  Sheets("opt_broj").Cells(5 + j, 8 + 65) = T_N

'-----

Next ii

Sheets("opt_broj").Range("e27") = 2 * Abz2_pz ' 2x bocni zid u pz
Sheets("opt_broj").Range("e28") = A_strz2_pz ' straznji zid u pz
Sheets("opt_broj").Range("e29") = Anc_pz ' nosece cijevi u pz

```

Slika 4. Kod procedure "Promjena\_opterećenja"



Opterećenje se mijenja naredbom "For ii=15 to 50 Step 5" koja mijenja opterećenje prema zahtjevu za proizvedenu paru od 15 t/h do 50 t/h s korakom od 5 t/h tj, od 30% do 100% s korakom od 10% nazivnog opterećenja. Zatim se poziva procedura termodinamičkog proračuna ukupnog postrojenja retkom NPG\_Rafinerija\_Sisak koja pruža potrebne podatke o veličinama stanja za hidraulički proračun. U te podatke spadaju opterećenja ložišta i konvektivnog kanala, tlak u bubnju, temperatura napojne vode, dimenzije ložišta. Slijedi izvršavanje ukupne procedure Hidrauličkoi\_proračuna za zadamo opterećenje. Redak "Next ii" vraća proces na naredbu "For" dok ii ne dosegne 50, što je ujedno i nazivno opterećenje.

### 3.2.2. Procedura: Hidraulički\_proračun

Prvo se definiraju početni uvjeti veličina  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5, \rho_6, \rho_7$ ,  $H_{2e}, H_{3e}, H_{4e}, H_{5e}, H_{6e}, H_{7e}, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7$ , dimenzije cijevi, broj cijevi, te podatci o opterećenju dobiveni prethodno obavljenom procedurom ukupnog termodinamičkog proračuna. Zatim se postavlja petlja kojom se provodi iterativni postupak. Unutar petlje se iznova pozivaju procedure za proračun masenog protoka u uzlaznim cijevima iz uvjeta za jednakost pada tlaka u silaznim i uzlaznim cijevima. Dobivene vrijednosti masenih protoka uzlaznih cijevi se zbrajaju te se dobiva maseni protok silaznih cijevi, koji ulazi u sljedeću iteraciju kao dio informacije za ponovni proračun masenih protoka uzlaznih cijevi. Proračun se ponavlja dok se greška ne smanji ispod zadane vrijednosti.

```
pocetak:
    iii = iii + 1
    m1a = m1
    m2a = m2
    m5a = m5
    H2e1 = H2e
    H3e1 = H3e
    H4e1 = H4e
    H5e1 = H5e
    H6e1 = H6e
    H7e1 = H7e
    'TEMPERATURA SILAZNE VODE
    T_1 = T_B - 1 / (O_br) * (T_B - T_N) ' temperatura mješavine (za pretpostavljene konstantne c_ove = temp zasićenja(temperatura bubnja)-obr*(temp v
    DT = 1 / (O_br) * (T_B - T_N)

    '-----
    'PRORAČUN U POJEDINIM SNOPOVIMA CIJEVI
    Uzlazna_Cijev_Prednja_strana
    Uzlazna_Cijev_Bočne_strane
    Uzlazna_Cijev_Stražnja_1_prolaz
    Uzlazna_Cijev_Stražnja_2_prolaz
    Uzlazna_Cijev_Bočne_strane_2_prolaz
    Uzlazna_Cijev_Noseće_cijevi
    '-----

    m1 = m2 + m3 + m4 + m5 + m6 + m7

    '-----
    'VELIČINE ZA SLJEDEĆU ITERACIJU ZA SILAZNU CIJEV dinamička viskoznost, reynolds, lambdal, gustoća vode silaznih cijevi, ukupni optočni broj.
    din_visk_1 = Voda(4, pB, T_B)
    Re_1 = m1 * 4 / (D1 * Fi * din_visk_1)
    lambdal = 4 * 0.046 * Re_1 ^ (-0.2)
    gust_m1 = m1 / (A1 * n1)
    ro_Dp1 = Voda(2, pB, T_1)
    O_br = m1 / (m2 * x_i2 + m3 * x_i3 + m4 * x_i4 + m5 * x_i5 + m6 * x_i6 + m7 * x_i7)

    epsilon_m1 = Abs(m1 - m1a)
    epsilon_m2 = Abs(m2 - m2a)
    epsilon_m22 = Abs(m22 - m2)
    epsilon_m5 = Abs(m5 - m5a)
    epsilon_H2e = Abs(H2e1 - H2e)
    epsilon_H3e = Abs(H3e1 - H3e)
    epsilon_H4e = Abs(H4e1 - H4e)
    epsilon_H5e = Abs(H5e1 - H5e)
    epsilon_H6e = Abs(H6e1 - H6e)
    epsilon_H7e = Abs(H7e1 - H7e)

    If epsilon_m1 > 0.00005 Or epsilon_H2e > 0.00001 Or Abs(m22 - m2) > 0.0005 Or epsilon_m5 > 0.000000000005 Or epsilon_H3e > 0.00001 Or epsilon_H4e >
```

Slika 5. Petlja procedure "Hidraulički\_proračun"

**3.2.3. Procedure: Uzlazna\_Cijev\_Prednja\_strana, Uzlazna\_Cijev\_Bočne\_strane, Uzlazna\_Cijev\_Stražnja\_1\_prolaza, Uzlazna\_Cijev\_Stražnja\_strana\_2\_prolaz, Uzlazna\_Cijev\_Bočne\_strane\_2\_prolaz, Uzlazna\_Cijev\_Nosece\_cijevi**

Ove procedure se pozivaju unutar procedure Hidraulički\_proračun, a služe za proračun masenog protoka prema izvedenim jednadžbama u poglavlju 3.1.2. Za proračun masenog protoka potrebno je poznavati:

-ukupni maseni protok, lokalne i linijske otpore strujanju u silaznim cijevima, površinu poprečnog presjeka silaznih cijevi, broj silaznih cijevi, visinu ložišta, gustoću vode u silaznim cijevima, specifičnu entalpiju silaznih cijevi te tlak i temperaturu na ulazu u silazne cijevi.

-Visinu ekonomajzerskog dijela isparivačkog dijela cijevi, visinu isparivačkog dijela, linijske i lokalne otpore strujanju uzlaznih cijevi, broj i površine poprečnog presjeka uzlaznih cijevi, gustoće vode i specifičnu entalpiju na početku isparavanja u uzlaznim cijevima, specifičnu entalpiju na kraju isparavanja, specifičnu entalpiju zasićene pare.

**3.2.3.1. Funkcije za određivanje veličine stanja vode**

U Excel-u su implementirane funkcije za dobivanje veličina stanja vode. Pozivaju se naredbama "Voda(Ntab, p, T)" za veličine stanja pothlađene kapljevine i pregrijane pare te "Zas(Izas, p)" za veličine stanja mokre pare. Predstavljaju interpolirane veličine stanja iz toplinskih tablica za vodu. U funkcijama p i T predstavljaju tlak i temperaturu, a Ntab i Izas veličinu stanja koju želimo odrediti.

Tablica 4. "Izas" za funkciju "Zas(Izas, p)"

Izas	Veličina
0	$t'$
1	$h'$
2	$\rho'$
3	$s'$
11	$h''$
12	$\rho''$
13	$s''$

Tablica 5. "Ntab" za funkciju "Voda(Ntab, p, T)"

Ntab	Veličina
1	$h_w$ entalpija vode ili preg. pare
2	$\rho_w$ gustoća vode ili preg. pare
3	$s_w$ entropija vode ili preg. pare
4	$\mu_w$ din. viskozitet vode ili preg. pare
5	$\lambda_w$ toplinska vodljivost vode ili preg. pare
6	$Pr_w$ Prandtlov broj vode ili preg. pare

### 3.2.3.2. Tijek procedura za proračun masenog protoka silaznih cijevi

U prvu iteraciju ulaze pretpostavljene veličine masenog protoka silaznih cijevi, gustoće vode silaznih cijevi te gustoće vode u uzlaznim cijevima u točki zasićenja, linijski otpori te visine ekonomajzerskog i isparivačkog dijela isparivačkih cijevi. Nakon prve iteracije na temelju dobivenog masenog protoka i pada tlakova u uzlaznim cijevima dobivamo veličine stanja potrebne za sljedeću iteraciju. Petlja se zatvara kad se ispuni zadani uvjet točnosti, odnosno procedura se prestaje pozivati iz hijerarhijski više procedure.

```

'-----
'RAČUN:
p_i = pB + Dp1 - Dp2e
x_i2 = x_i2
Optočni_broj
'Pad tlaka u uzlaznoj cijevi kao posljedica gravitacijskog utjecaja
Dp2gr = ((ro_Dp1 * H2e + ro_Dp2 * H2i * r4) * g) * (1 / 100000)

'Pad tlaka u uzlaznoj cijevi kao posljedica utjecaja trenja
Dp2tr = (((lambda2 * L2e / D2 + sum_lok2e) * 1 / (2 * ro_Dp1) + (lambda2 * L2i / D2 + sum_lok2i) * 1 / (2 * ro_Dp2) * r3) * gust_m2 ^ 2) * (1 / 100000)
'Pad tlaka u uzlaznoj cijevi kao posljedica aceleracijskog utjecaja
Dp2ac = (gust_m2 ^ 2 * ((1 / ro_Dp2 - 1 / ro_Dp1) + 1 / ro_Dp2 * r2)) * (1 / 100000)
'Ukupni pad tlaka
Dp2 = Dp2tr + Dp2ac + Dp2gr
'korjen iz brojnik / nazivnik fizikalno predstavlja gustoću masenog toka!
brojnik12 = Dp1gr - Dp1tr - Dp2gr
nazivnik12 = (((lambda2 * L2e / D2 + sum_lok2e) * 1 / (2 * ro_Dp1) + (lambda2 * L2i / D2 + sum_lok2i) * 1 / (2 * ro_Dp2) * r3) + ((1 / ro_Dp2 - 1 /
'Ukupni maseni protok ulaznih cijevi ?strane
m22 = Sqr(brojnik12 / nazivnik12) * (n2 * A2)
m2 = m2 + 0.05 * (m22 - m2)

'-----
'VELIČINE ZA SLJEDEĆU ITERACIJU ZA UZLAZNU CIJEV
'dh_dp2 = 1.0863 * (pB + Dp1 - Dp2e) ^ 2 + 17.1314 * (pB + Dp1 - Dp2e) + 101.58 'za ovo triba h2e, dh_dp2 za tlak u točki početka ključanja, znaci ovisi o
dh_dp2 = -2.66667E-24 * ((pB + Dp1 - Dp2e) * 100000) ^ 3 + 3.28687E-17 * ((pB + Dp1 - Dp2e) * 100000) ^ 2 + (-0.000000000144879) * ((pB + Dp1 - Dp2e) * 10
ro_Dp2 = Zas(2, pB + Dp1 - Dp2e)
gust_m2 = m2 / (A2 * n2)

H2e = H2e + 0.3 * (H2ee - H2e)
H2i = H_B - H2e
'L2e
If H2e <= H_B - odsjecak1 Then
    L2e = H2e
Else
    L2e = (H_B - odsjecak1) + (odsjecak1 - (H_B - H2e)) / Sin(kut_rad1)
End If
L2i = L2 - L2e
Dp2e = ((ro_Dp1 * H2e * g) + (lambda2 * L2e / D2 + sum_lok2e) * 1 / (2 * ro_Dp1) * gust_m2 ^ 2 + gust_m2 ^ 2 * (1 / ro_Dp2 - 1 / ro_Dp1)) * (1 / 100000) 'p
din_visk_2 = 1 / (1 / (Zas(4, pB + Dp1 - Dp2e) / 1000000) * (1 + x_i2 * (Zas(4, pB + Dp1 - Dp2e) / Zas(14, pB + Dp1 - Dp2e) - 1)))

hhhhh2323 = Zas(14, pB + Dp1 - Dp2e)
asdasdasda = Zas(4, pB + Dp1 - Dp2e)
Re_2 = m2 * 4 / (D2 * Pi * din_visk_2)

lambda2 = 4 * 0.046 * Re_2 ^ (-0.2)

```

Slika 6. Proračun masenog protoka uzlaznih cijevi prednje stranje ložišta

## 3.2.3.3. Podrelaksacija

Tijekom iteriranja proračun je pokazao veliku nestabilnost. Veća nestabilnost pokazuje se u skupinama cijevi gdje je niži omjer ukupne dovedene topline i ukupnog poprečnog presjeka skupine cijevi. Najviša nestabilnost se javlja u bočnim cijevima prvog prolaza, stražnje strane i bočnih strana drugog prolaza. Korištena je jaka podrelaksacija. Prednja strana i stražnja strana ložišta te nosive cijevi u sljedeću iteraciju uzimaju 5% novo izračunate vrijednosti, bočne strane ložišta i stražnja strana konvektivnog kanala 0.5%, a bočne strane konvektivnog kanala 0.2% novo izračunate vrijednosti. Stoga promjena masenog protoka bočnih strana konvektivnog kanala je najbitniji kriterij konvergencije. Proračun traje dok promjena tog masenog protoka ne padne ispod  $5 \cdot 10^{-12}$ .

Podrelaksacije:

$$m_2^{n+1} = m_2^n + 0.05 \cdot (m_2^{n+1} - m_2^n) \quad (62)$$

$$m_3^{n+1} = m_3^n + 0.005 \cdot (m_3^{n+1} - m_3^n) \quad (63)$$

$$m_4^{n+1} = m_4^n + 0.05 \cdot (m_4^{n+1} - m_4^n) \quad (64)$$

$$m_5^{n+1} = m_5^n + 0.005 \cdot (m_5^{n+1} - m_5^n) \quad (65)$$

$$m_6^{n+1} = m_6^n + 0.002 \cdot (m_6^{n+1} - m_6^n) \quad (66)$$

$$m_7^{n+1} = m_7^n + 0.05 \cdot (m_7^{n+1} - m_7^n) \quad (67)$$

## 3.2.4. Procedura: Množitelji

Množitelji dvofaznog pada tlaka funkcija su tlaka na početku isparavanja i masenog udjela pare na izlazu iz uzlaznih cijevi. Svaka skupina cijevi različitih je geometrijskih karakteristika i različito je toplinski opterećena, stoga će se u svakoj od njih razlikovati traženi tlak i maseni udio pare. Shodno tome potrebno je iznova računati vrijednosti množitelja za svaku skupinu cijevi u svakoj iteraciji. Koriste se podatci o tlaku i masenom udjelu pare iz prethodne iteracije za dobivanje njihovih vrijednosti prije svakog ulaska u jednadžbu za maseni protok pripadajuće skupine cijevi.

```
x_i2 = (qkg2 - Zas(1, pB + Dp1 - Dp2e) + Voda(1, pB + Dp1, T_1)) / (Zas(11, pB + Dp1 - Dp2) - Zas(1, pB + Dp1 - Dp2e))
'-----
'RAČUN:
p_1 = pB + Dp1 - Dp2e
x_i = x_i2
Množitelji
```

Slika 7. Veličine stanja za dobivanje vrijednosti množitelja i pozivanje same procedure

```

If p_1 > 17 And p_1 <= 41 Then
    gamma_thom = 40 + (p_1 - 17) / (41 - 17) * (20 - 40)
Else
    gamma_thom = 20 + (p_1 - 41) / (86 - 41) * (9.8 - 20)
End If

S_thom = 0.93 * (Zas(2, p_1) / Zas(12, p_1)) ^ 0.11 + 0.07 * (Zas(2, p_1) / Zas(12, p_1)) ^ 0.561 'slip faktor... vjerojatno isto sto i gamma_thom
alfa_thom = Zas(2, p_1) / Zas(12, p_1)

r2 = (1 + x_i * (gamma_thom - 1)) * (1 + x_i * (alfa_thom - gamma_thom) / gamma_thom) - 1 ' r2 faktor za pad tlaka zbog akceleracije
r3 = izracunaj_r3(x_i, p_1)
r4 = (gamma_thom / alfa_thom - 1) / (gamma_thom - 1) + ((gamma_thom - gamma_thom / alfa_thom) / (gamma_thom - 1) ^ 2) * Log(x_i * (gamma_thom - 1) + 1) / x_i

```

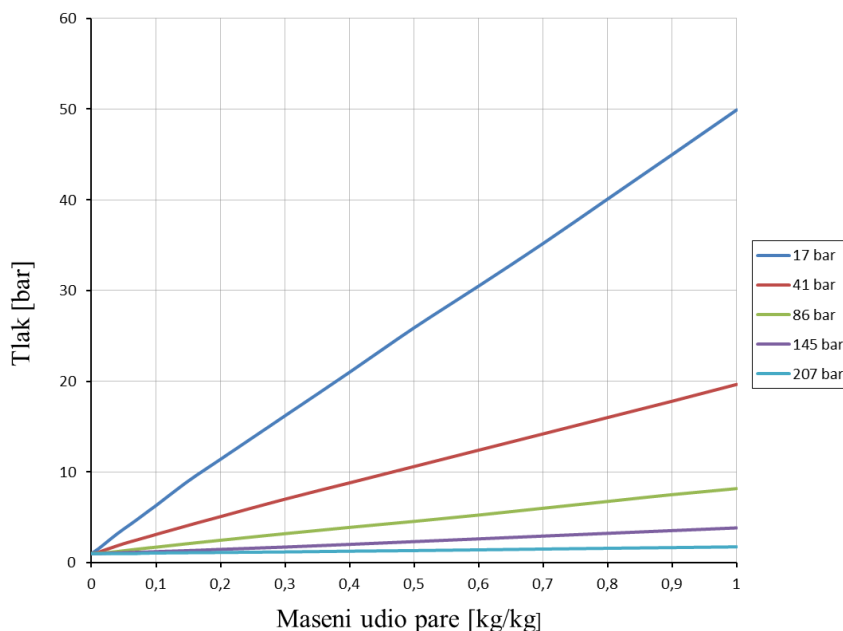
Slika 8. Procedura "Množitelji"

Sama procedura se sastoji od izraza za dobivanje vrijednosti množitelja  $r_2$  i  $r_4$ , a vrijednost  $r_3$  se dobiva pozivanjem funkcije "izracunaj\_r3".

#### 3.2.4.1. Funkcija: izracunaj\_r3

Korelacija između  $r_3$ , tlaka i masenog udjela pare, zbog nemogućnosti prikazivanja jedinstvenom jednadžbom, prikazana je Tablicom 2. za različite vrijednosti tlakova.

Za svaki od tlakova iz jednadžbe pronađena je linearna korelacija između množitelja  $r_3$  i masenog udjela pare.



Slika 9. Linearna ovisnost množitelja o porastu udjela pare na zadanom tlaku

Ukoliko se tlak nalazi izmađu vrijednosti na kojima su veličine množitelja vrši se interpolacija između pripadajućih tlakova. Kod čijim se izvršavanjem dobivaju vrijednosti funkcije "izracunaj\_r3" prikazan je Slikom 10.

```
Function izracunaj_r3(x_i, p_1)

izracunaj_r3_1 = 48.7 * x_i + 1.2963      '17bar
izracunaj_r3_2 = 18.635 * x_i + 1.1595   '41bar
izracunaj_r3_3 = 7.2144 * x_i + 0.9727   '86bar
izracunaj_r3_4 = 2.8417 * x_i + 0.9393   '145bar
izracunaj_r3_5 = 0.7499 * x_i + 0.9743   '207bar

If p_1 <= 17 Then
    izracunaj_r3 = izracunaj_r3_1
Else
    If p_1 > 17 And p_1 <= 41 Then
        izracunaj_r3 = izracunaj_r3_1 + (p_1 - 17) / (41 - 17) * (izracunaj_r3_2 - izracunaj_r3_1)
    Else
        If p_1 > 41 And p_1 <= 86 Then
            izracunaj_r3 = izracunaj_r3_2 + (p_1 - 41) / (86 - 41) * (izracunaj_r3_3 - izracunaj_r3_2)
        Else
            If p_1 > 86 And p_1 <= 145 Then
                izracunaj_r3 = izracunaj_r3_3 + (p_1 - 86) / (145 - 86) * (izracunaj_r3_4 - izracunaj_r3_3)
            Else
                If p_1 > 145 And p_1 <= 207 Then
                    izracunaj_r3 = izracunaj_r3_4 + (p_1 - 145) / (207 - 145) * (izracunaj_r3_5 - izracunaj_r3_4)
                Else
                    izracunaj_r3 = izracunaj_r3_5
                End If
            End If
        End If
    End If
End If

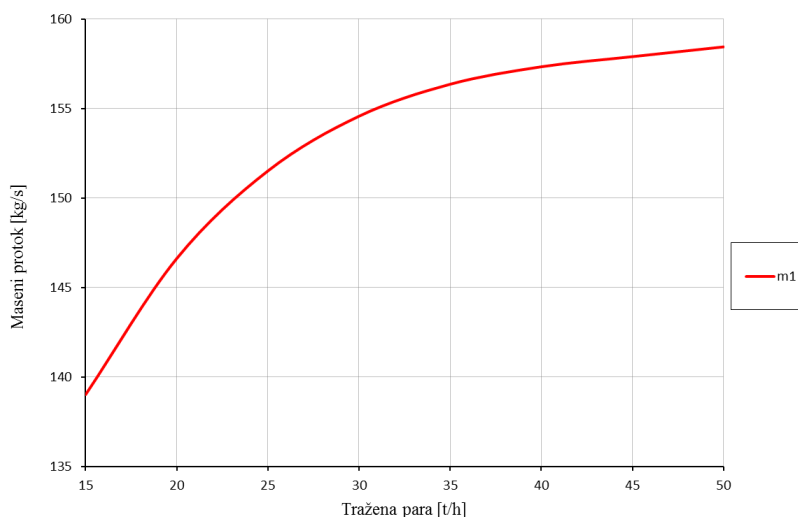
End Function
```

Slika 10. Funkcija za izračunavanje  $r_3$  interpolacijom

## 4. ANALIZA PODATAKA

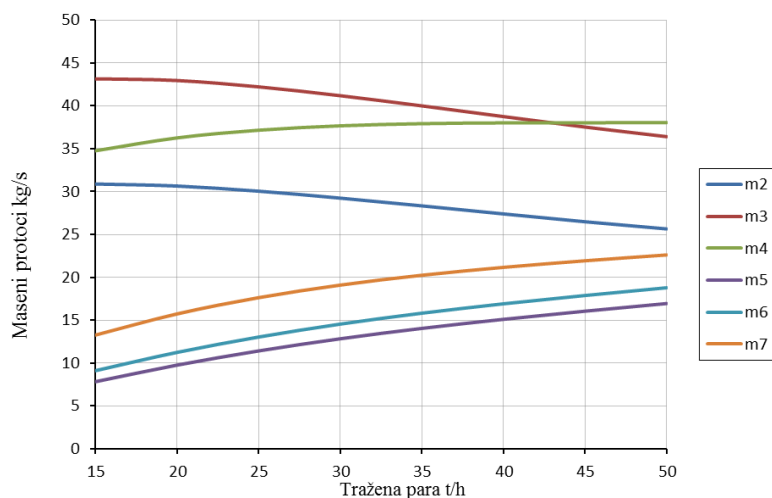
### 4.1. Maseni protoci

Ukupni maseni protok ne raste linearno s linearnim porastom opterećenja što je vidljivo na slici 11.



Slika 11. Ukupni maseni protok

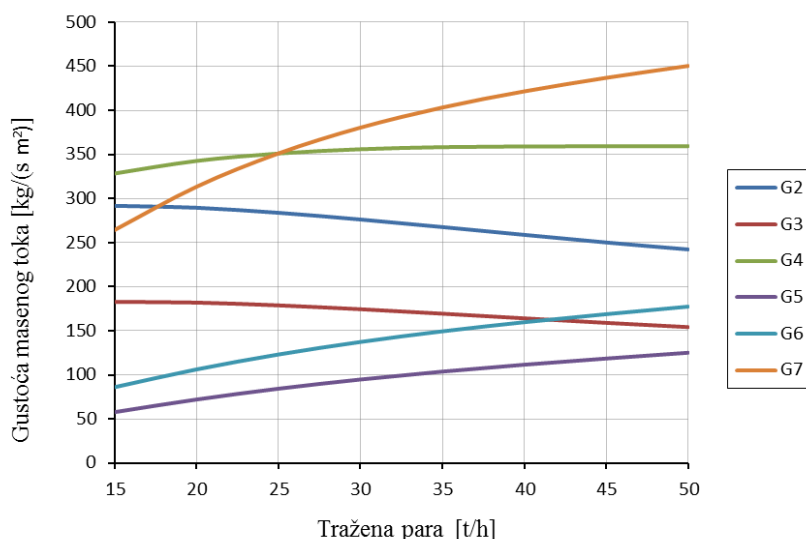
Maseni protoci silaznih cijevi ovise o površini na koju se dovodi toplina i toplinskom opterećenju tih površina. Tako se najveći maseni protok uspostavlja na bočnoj strani prvog prolaza, gdje je najveća površina cijevi, i stražnjoj strani prvog prolaza koja je toplinski opterećena sa obje strane. Također nosive cijevi, koje su opterećene s obje strane, imaju veliki maseni protok u odnosu na površinu poprečnog prjesjeka cijevi.



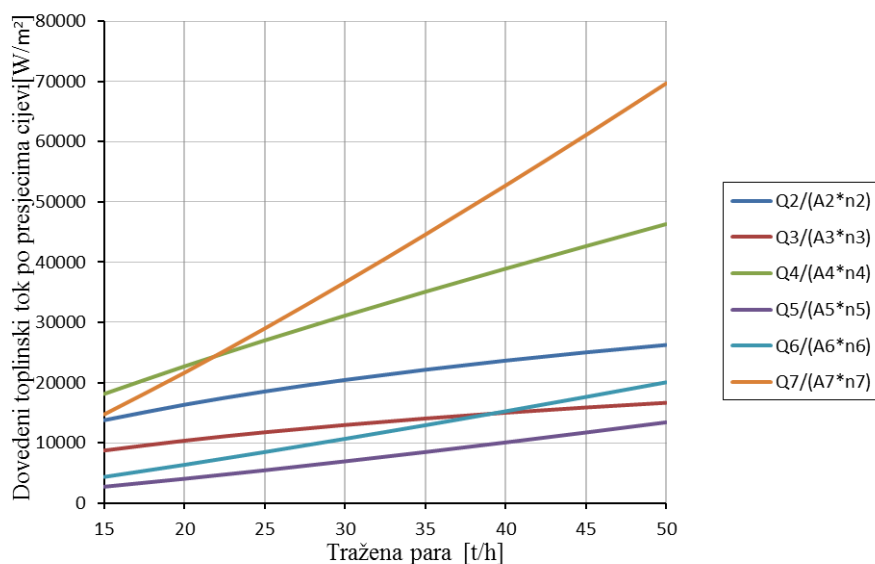
Slika 12. Maseni protok pojedine skupine uzlaznih cijevi

#### 4.2. Veza između gustoće masenog toka, dovedene toplina po poprečnom presjeku cijevi i proizvedene pare

Vjerniji prikaz što se zbiva sa samom vodom pri grijanju u različitim grupama cijevi daje usporedba gustoća masenog toka i omjera ukupne dovedene topline po ukupnoj površini presjeka cijevi:

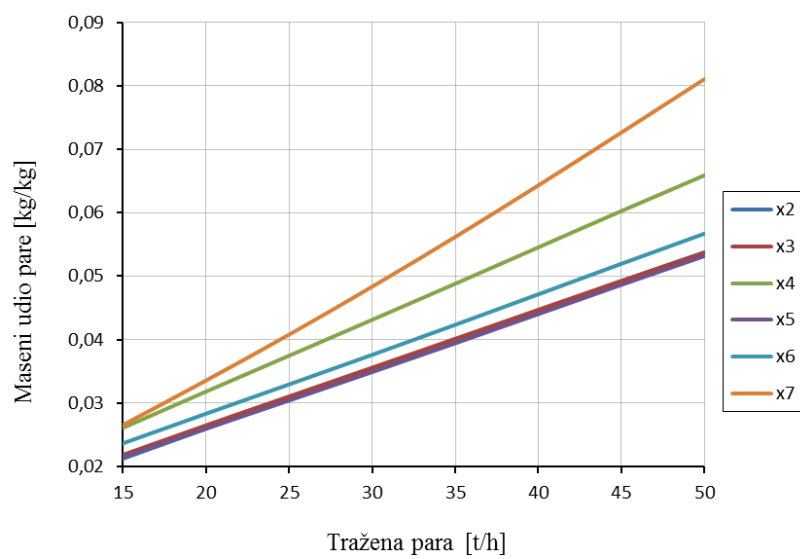


Slika 13. Gustoće masenog toka uzlaznih cijevi



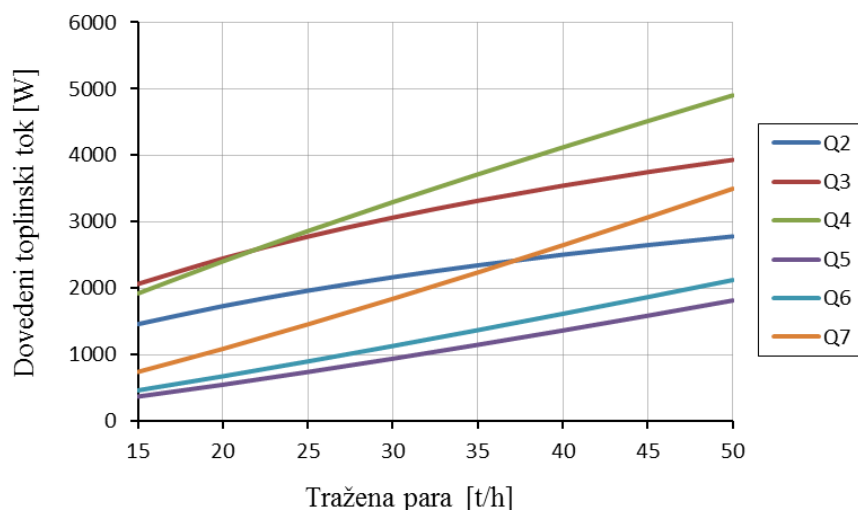
Slika 14. Omjer dovedene topline i površine ukupnog poprečnog prjesjeka cijevi



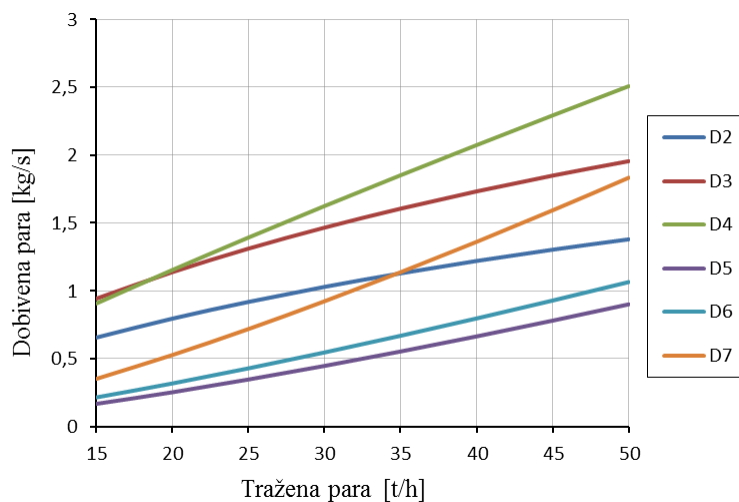


Slika 15. Maseni udio pare po pojedninoj skupini cijevi

### 4.3. Međusobna veze proizvedene pare i dovedene topline



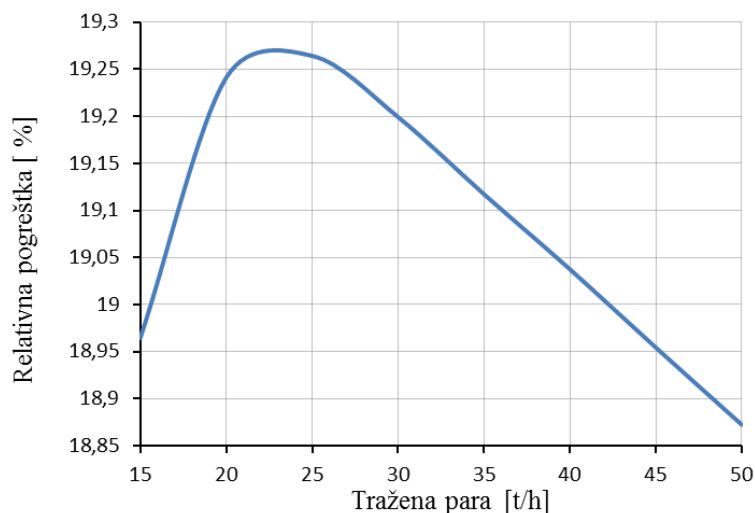
Slika 16. Dovedena toplina po skupini cijevi



Slika 17. Proizvedena para po skupini cijevi

Proizvedena para po skupini cijevi i dovedena toplina imaju identično položene krivulje. Snažna korelacija proizlazi iz činjenice da je voda u silaznim cijevima gotovo na temperaturi zasićenja, a dovedena toplina koristi se za isparavanje vode, odnosno proizvodnju pare.

#### 4.4. Pogreška u odnosu na proračun cijelog modela



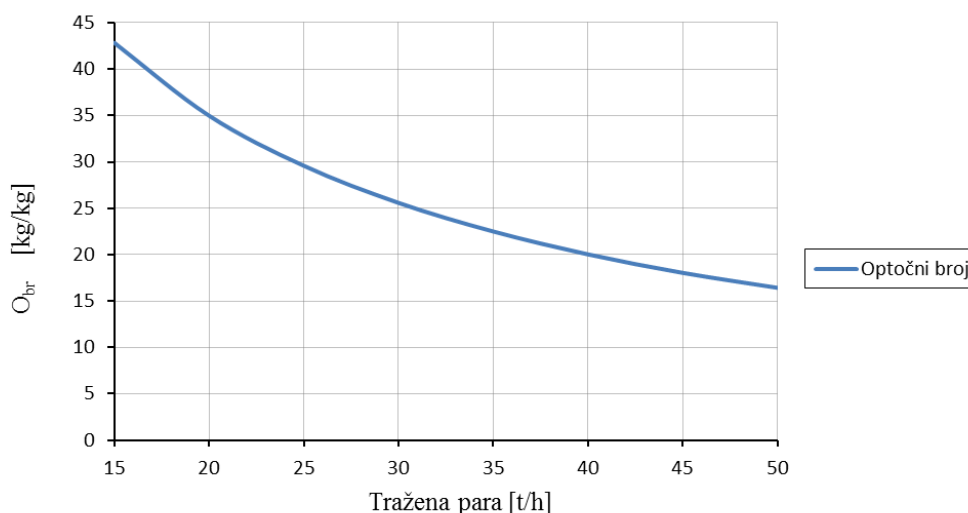
Slika 18. Relativna pogreška u odnosu na proračun cijelog postrojenja

#### 4.5. Optočni broj

Optočni broj definiran je omjerom ostvarenog ukupnog masenog protoka i proizvedene pare

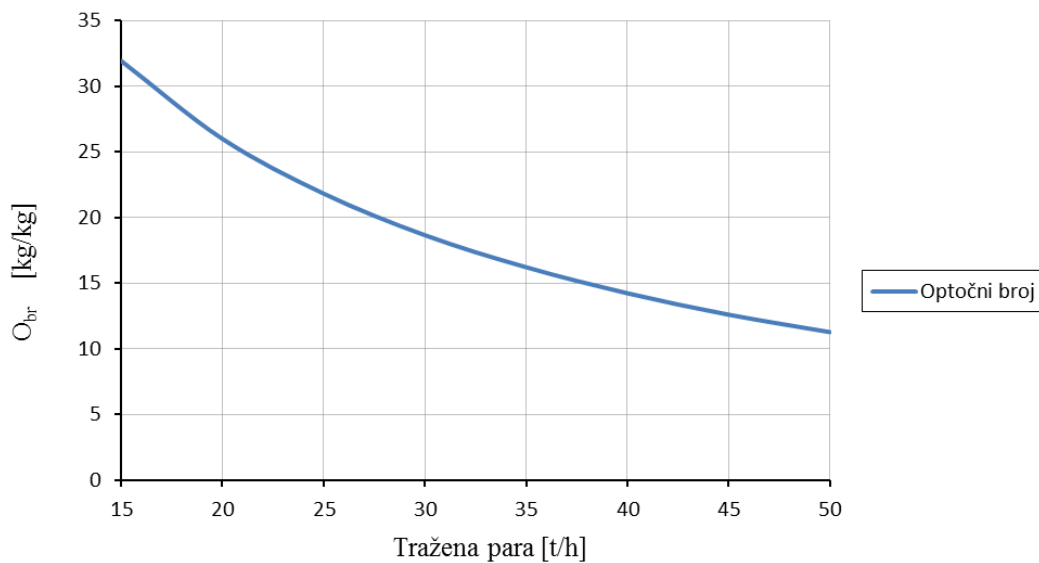
$$O_{br} = \frac{m_1}{D}$$

Optočni broj u prikazanom hidrauličkom proračunu opada porastom toplinskog opterećenja. To se objašnjava činjenicom da maseni protok raste sporije nego količina proizvedene pare porastom opterećenja.



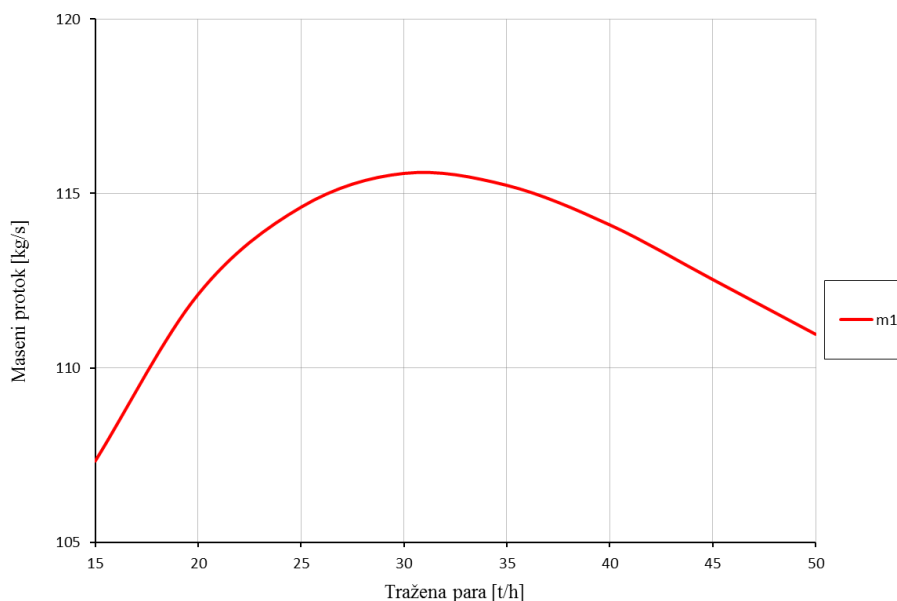
Slika 19. Optočni broj

Povećanjem radnog tlaka postrojenja za dva puta u svim radnim točkama proračuna, optočni broj opada.

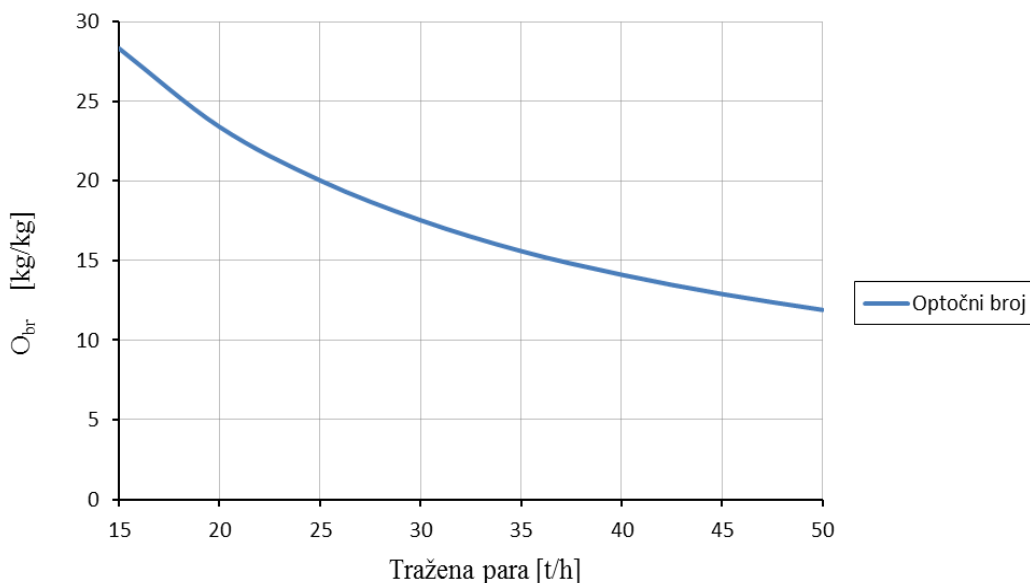


Slika 20. Optočni broj za dva puta veći radni tlak

Funkcija masenog postrojenja doseže svoj maksimum u radnom području postrojenja. Unatoč porastu opterećenja, maseni tok se smanjuje.

Slika 21. Maseni protok za  $p_{2B} = 2 \cdot p_B$ 

Dodatnim porastom tlaka optočni broj nastavlja padati.



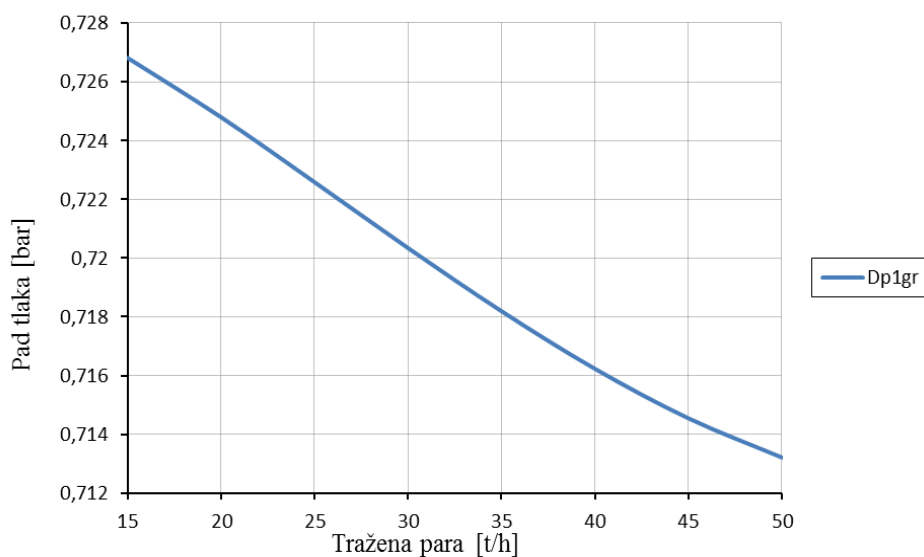
Slika 22. Optočni broj za tri puta veći radni tlak

#### 4.6. Padovi tlaka u silaznim i uzlaznim cijevima

##### 4.6.1. Silazne cijevi

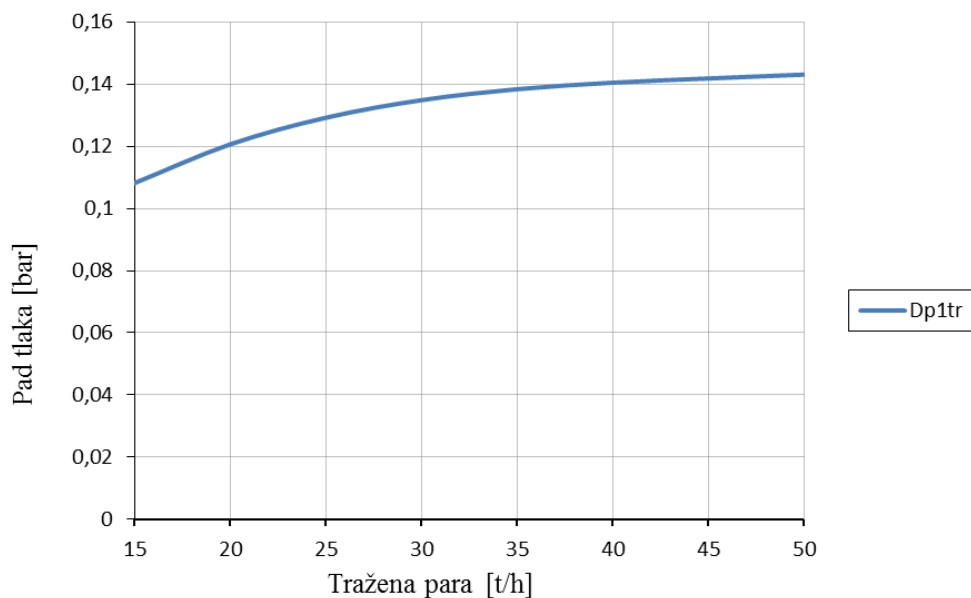
Tijekom procesa dolazi do povećanja temperature zasićenja, kao posljedica povećanja radnog tlaka. Pad temperature zbog miješanja na ulazu u silazne cijevi raste kao posljedica smanjenja optočnog broja. Jači utjecaj na promjenu temperature u silaznim cijevima ima

promjena radnog tlaka. Stoga dolazi do povećanja temperature vode u silaznim cijevima, odnosno pada gustoće u silaznim cijevima



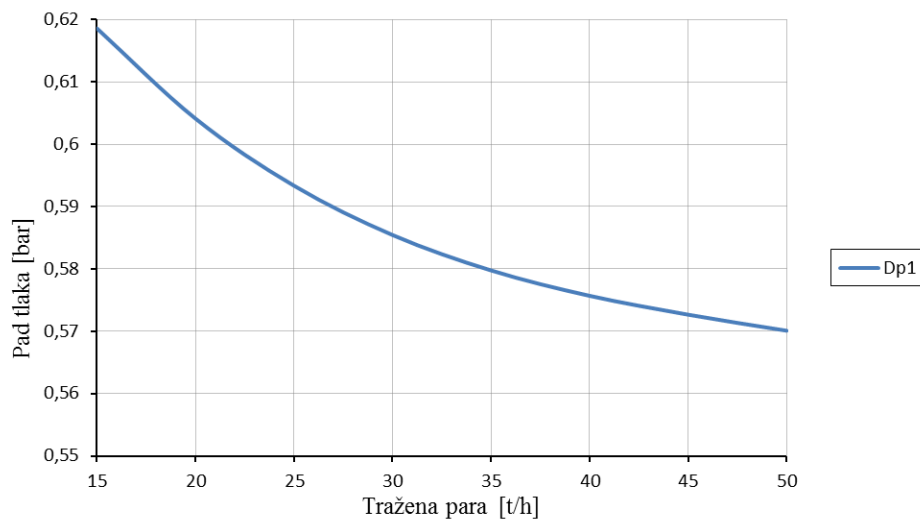
Slika 23. Promjena pada tlaka uslijed gravitacijskog utjecaja

Pad tlaka kao posljedica trenja u silaznim cijevima raste povećanjem masenog protoka. Kako maseni protok raste na cijelom području povećanja opterećenja tako raste i pad tlaka uslijed trenja.



Slika 24. Pad tlaka kao posljedica trenja u silaznim cijevima

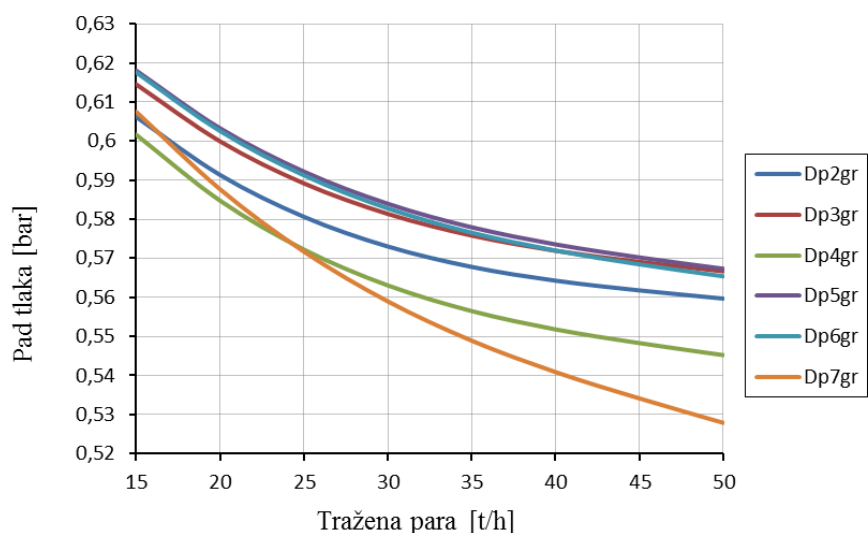
Ukupni pad tlaka u silaznim, definiran kao razlika pada tlaka uslijed gravitacije i pada tlaka uslijed trenja, cijevima tijekom procesa opada:



Slika 25. Ukupni pad tlaka u silaznim cijevima

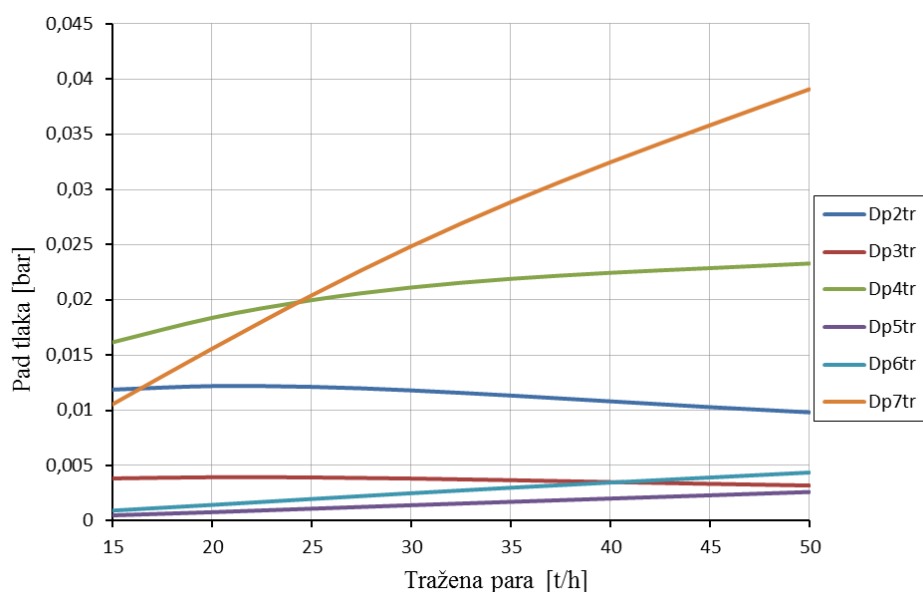
#### 4.6.2. Uzlazne cijevi

Pad tlaka kao posljedica gravitacijskog utjecaja u uzlaznim cijevima opada povećanjem opterećenja generatora pare. Uzrokom možemo povećanje udjela parne faze.



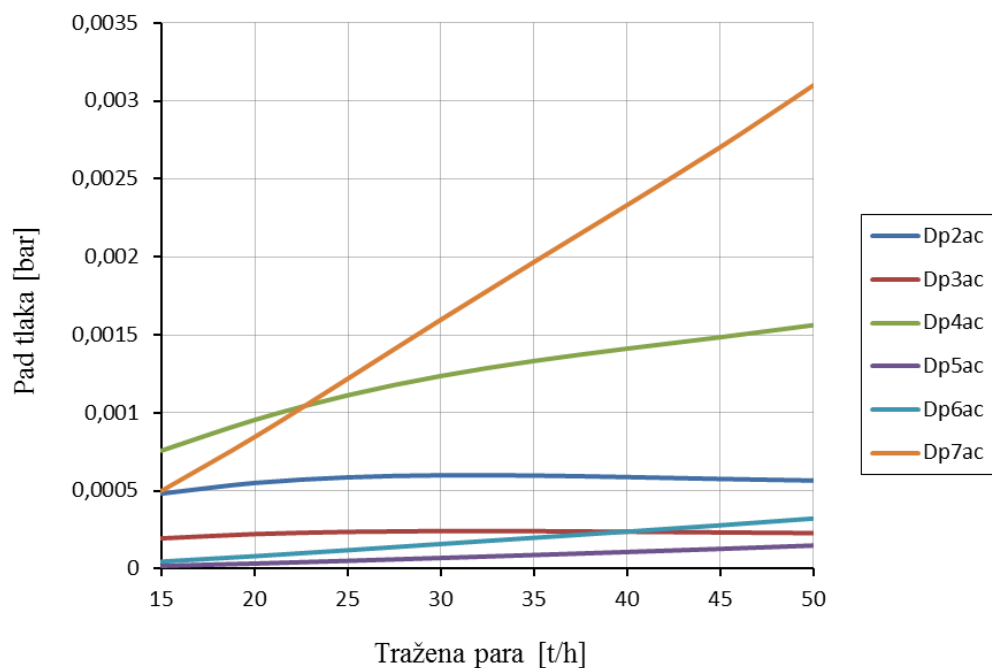
Slika 26. Pad tlaka uslijed gravitacijskog utjecaja

Krivulje pada tlaka uslijed trenja u uzlaznim cijevima prati trendove krivulja gustoća masenih tokova u uzlaznim cijevima.



Slika 27. Pad tlaka uslijed trenja u uzlaznim cijevima

Isto se može reći i za pad tlaka uslijed akceleracijskog učinka.



Slika 28. Pad tlaka uslijed akceleracijskog učinka u uzlaznim cijevima



## 5. ZAKLJUČAK

Cirkulacija vode u isparivačkim cijevima generatora pare je složen proces, podložen mnogim utjecajima. U analizi podataka se pokazalo da je ovisnost masenog protoka pojedine skupine cijevi najjača o količini dovedenog toplinskog toka na ukupnu površinu cijevi, a gustoća masenog toka ovisi o omjeru dovedenog toplinskog toka na površinu poprečnog presjeka cijevi. S obzirom da sve uzlazne cijevi imaju jednaku razliku u visini od ulaza do izlaza cijevi veća količina topline na isti presjek površine cijevi se dovodi opterećenjem cijevi s obje strane (noseće cijevi, stražnja strana prvog prolaza) te povećanjem površine dovedene topline (prednja strana prvog prolaza i stražnja strana prolaza) u odnosu na visinu.

U dobivenim podacima javlja se pogreška u odnosu na prethodno napravljen proračun što se očituje kao manjak proizvedene pare za oko 19%. Model ima mogućnost poboljšanja u vidu poznavanja raspodjele toplinskog oprećenja unutar ložišta uslijed zračenja plamena, modeliranja prijenosa topline konvekcijom u ložištu i u konvektivnom kanalu generatora pare. Na poboljšanje rezultata utjecaj bi imalo i detaljnije poznavanje geometrija samog generatora pare, kao i lokalnih otpora strujanju.

## LITERATURA

Skripta, Generatori pare

<http://thermopedia.com/content/2/>.

Galović, A.: Termodinamika 1, Zagreb, 2003.

<http://www.homeandlearn.org/>

<http://mycurvefit.com/>

[http://www.energy.kth.se/compedu/webcompedu/ManualCopy/Steam\\_Boiler\\_Technology/Steam\\_water\\_circulation/steam\\_water\\_circulation.pdf](http://www.energy.kth.se/compedu/webcompedu/ManualCopy/Steam_Boiler_Technology/Steam_water_circulation/steam_water_circulation.pdf)

## **PRILOZI**

CD-R disc